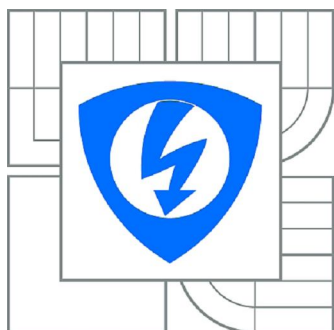


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI OPTOVLÁKNOVÝM INTERFEROMETREM

ANGULAR VELOCITY MEASUREMENT WITH FIBER OPTIC INTERFEROMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

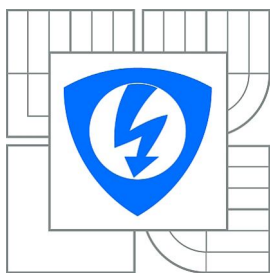
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL SODOMKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Pavel Sodomka
Ročník: 3

ID: 125636
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měření úhlové rychlosti optovláknovým interferometrem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Podrobně se seznámte s problematikou měření úhlové rychlosti na principu Sagnacova jevu.
- 2) Rozeberte možné konstrukce optických a zejména optovláknových interferometru pro měření úhlové rychlosti. Detailně popište minimální vyváženou konfiguraci Sagnacova vláknového interferometru a definujte vlastnosti jednotlivých komponent měřicí sestavy (optické i optovláknové).
- 3) Navrhněte a realizujte sestavu optovláknového snímače pro měření úhlové rychlosti a demonstруйте jeho funkčnost.
- 4) Navrhněte a sestavte laboratorní úlohu využívající navržený optovláknový snímač.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] López-Higuera, J. M. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology. First Edition, Wiley, 2002. ISBN 978-0471820536.
- [2] DeCusatis, C.M., DeCusatis, C.J.S. Fiber Optic Essentials. Academic Press/Elsevier, 2006. ISBN 0-12-208431-4.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 28.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu a realizaci optovláknového interferometru využívajícího Sagnacova jevu, který měří úhlové rychlosti.

V teoretické části této práce jsou blíže popsány a specifikovány možné interferometry, základ interference vln, problematika rotačního pohybu. Je zde vysvětlen a popsán Sagnacův jev. Dále jsou detailně rozebrány možné konstrukce optovláknových interferometrů pro měření úhlové rychlosti, včetně popsanych chyb, které brání k správnému sestavení a realizace snímáče.

V praktické části této práce je navržen optovláknový interferometr s minimální vyváženou konfigurací. K dané konfiguraci jsou vybrány a popsány jednotlivé optické a optovláknové prvky, jako je zdroj záření, polarizátor, kontrolér polarizace, dělič, fázový modulátor, izolátor, detektor, optické vlákno a optovláknová cívka. Je zde specifikován a měřením podložen problém, který nedovolil sestavený optovláknový interferometr zdárně dokončit. Závěrem této práce je doporučení, jak vzniklý problém vyřešit.

KLÍČOVÁ SLOVA

Interference, interferometr, Sagnacův interferometr, konfigurace otevřené smyčky, konfigurace uzavřené smyčky, fázová modulace, minimální konfigurace, vzájemnost vln, nevzájemnost vln.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the proposal and implementation of optic-fibre interferometer using the Sagnac phenomenon which measures the angular speed.

In the theoretical part of this work, the possible interferometers are closer described and specified, base of wave interference, problems of the rotatory movement. The Sagnac phenomenon is explained and described here. Further the possible constructions of the optical-fibre interferometers for the measurement of the angular speed, including the described errors, which prevent the correct assembling and the implementation of the sensor.

In the practical part of this work, the optical-fibre interferometer with the minimal balanced configuration. The individual optical and optical-fibre elements are selected and described to the given configuration, such as the source of radiation, polarizer, controller of polarization, divider, phase modulator, isolator, detector, optical fibre and optical-fibre coil. There is the specified and based problem which did not allow to successfully finish the assembled optical-fibre interferometer. In conclusion of this work there is the recommendation how to solve the caused problem.

KEYWORDS

Interference, interferometer, Sagnac interferometr, open look configuration, closed look configuration, phase modulation, minimal configuration, mutuality (reciprocity) of waves, non-mutuality (non-reciprocity) of waves.

Bibliografická citace:

SODOMKA, P. *Měření úhlové rychlosti optovláknovým interferometrem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 51 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D..

Prohlášení

„ Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření úhlové rychlosti optovláknovým interferometrem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 28. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 28. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 9 |
| 2 | Interference..... | 10 |
| 3 | Interferometr..... | 13 |
| 3.1 | Michelsonův interferometr..... | 13 |
| 3.2 | Mach-Zehnderův interferometr..... | 14 |
| 3.3 | Sagnacův interferometr | 15 |
| 4 | Rotační pohyb..... | 17 |
| 4.1 | Úhlová poloha (dráha)..... | 17 |
| 4.2 | Úhlová rychlost | 18 |
| 4.3 | Úhlové zrychlení..... | 18 |
| 4.4 | Rovnoměrný pohyb po kružnici | 19 |
| 5 | Konstrukce vláknového Sagnacova interferometru | 20 |
| 5.1 | Základní otevřená smyčka..... | 20 |
| 5.2 | Základní otevřená smyčka se vzájemností | 21 |
| 5.3 | Konfigurace otevřené smyčky s fázovou modulací | 21 |
| 5.4 | Konfigurace uzavřené smyčky | 24 |
| 5.5 | FOG se spojkou 3x3 | 26 |
| 5.6 | RFOG a RFLG..... | 28 |
| 5.7 | Integrovaný optický gyroskop | 29 |
| 5.8 | Tříosá konfigurace..... | 30 |
| 6 | Realizace optovláknového snímače..... | 32 |
| 6.1 | Zvolená konfigurace | 32 |
| 6.2 | Světelný zdroj (S)..... | 33 |
| 6.3 | Dělič (DC)..... | 34 |
| 6.4 | Polarizační prvky..... | 35 |
| 6.4.1 | Polarizátor Glan-Thompson - Thorlabs GTH5M (P) | 36 |
| 6.4.2 | Kontrolér polarizace Thorlabs FPC562 | 36 |
| 6.4.3 | IO-H-1310APC - Fiber Isolator | 37 |
| 6.5 | Vlákno | 37 |
| 6.6 | Detektor (D) | 38 |
| 6.7 | Fázový modulátor..... | 39 |
| 6.8 | Optovláknová cívka..... | 41 |
| 6.9 | Konektorování optického vlákna | 43 |
| 7 | Závěr | 48 |
| 8 | Literatura..... | 50 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabulka 1 | Naměřené hodnoty pro první konektorování cívky | 45 |
| Tabulka 2 | Naměřené hodnoty pro nové konektorování..... | 45 |
| Tabulka 3 | Vyjádřený útlum v dB..... | 45 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1: Interference rovinných vln [2] | 10 |
| Obr. 2.2: Interference kruhových vln [2] | 10 |
| Obr. 2.3: Příklad dvou postupných příčných vln [3] | 11 |
| Obr. 2.4: Vznik interferenčního maxima [3] | 12 |
| Obr. 2.5: Vznik interferenčního minima [3] | 12 |
| Obr. 3.1: Michelsonův interferometr [3] | 13 |
| Obr. 3.2: Mach-Zehnderův interferometr [3] | 14 |
| Obr. 3.3: Sagnacův interferometr [3] | 15 |
| Obr. 3.4: Rotace cívky [19] | 15 |
| Obr. 4.1: Měření úhlové polohy [7] | 17 |
| Obr. 5.1 Základní smyčka [27] | 20 |
| Obr. 5.2 Konfigurace se dvěma spojkami [27] | 21 |
| Obr. 5.3 Gyroskop s fázovým modulátorem [27] | 22 |
| Obr. 5.4 Konfigurace uzavřené smyčky s digitální rampou [27] | 24 |
| Obr. 5.5 Digitální rampa [16] | 25 |
| Obr. 5.6 Digitální modulační řetězec [16] | 26 |
| Obr. 5.7 Gyroskop 3x3 [27] | 27 |
| Obr. 5.8 Geometrická protihodnota [27] | 28 |
| Obr. 5.9 RFOG [27] | 29 |
| Obr. 5.10 FRLG [19] | 29 |
| Obr. 5.11 Integrovaný Y [28] | 30 |
| Obr. 5.12 Ukázka použití integrované optiky [26] | 30 |
| Obr. 5.13 Tříosá konfigurace [26] | 31 |
| Obr. 6.1: Blokové schéma snímače [20] | 32 |
| Obr. 6.2: Závislosti polovodičového laseru [11] | 33 |
| Obr. 6.3: Technická specifikace laseru [18] | 34 |
| Obr. 6.4: Světelný zdroj [18] | 34 |
| Obr. 6.5: Dělič [22] | 35 |
| Obr. 6.6: Polarizátor [24] | 36 |
| Obr. 6.7: Polarizace v polarizátoru [24] | 36 |
| Obr. 6.8: Kontrolér polarizace [23] | 36 |
| Obr. 6.9 Izolátor [8] | 37 |
| Obr. 6.10: Detektor [25] | 38 |
| Obr. 6.11 Základní reakce [16] | 39 |
| Obr. 6.12 předpět'ová modulace čtvercové vlny [16] | 40 |
| Obr. 6.13 Nemodulovaná reakce a demodulovaný zkreslený signál FOG [16] | 40 |
| Obr. 6.14: Fázový modulátor [21] | 41 |
| Obr. 6.15 Rozměry cívky | 42 |
| Obr. 6.16 Reálná cívka | 43 |
| Obr. 6.17 Konektor FC/APC | 44 |
| Obr. 6.18 Schéma pro měření optického výkonu | 44 |
| Obr. 6.19 Spojka před cívkou | 46 |
| Obr. 6.20 Spojka za cívkou | 46 |
| Obr. 6.21 Problém realizace | 47 |

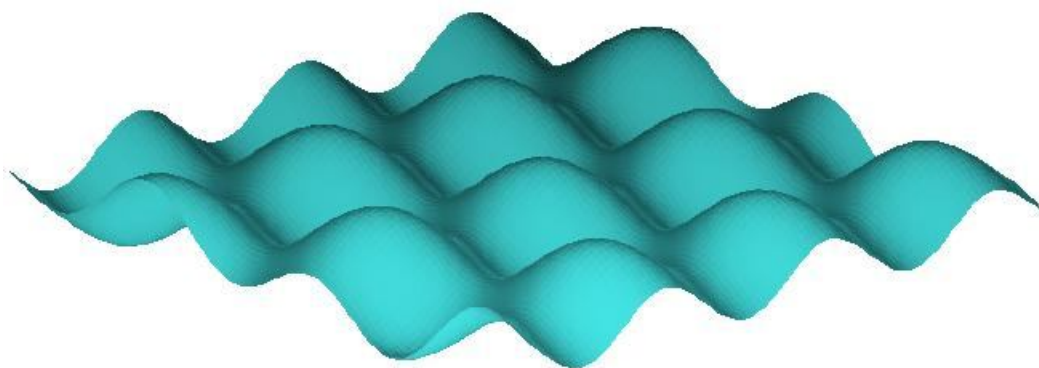
1 Úvod

Během posledních dvaceti let se vláknový optický gyroskop vyvinul z průkopnických fyzikálních experimentů do praktického zařízení, které je dnes zařazeno do výroby. Pokrok na vývoji tohoto senzoru má svůj velký podíl vývoj jednotlivých optických komponentů a komunikace mezi nimi.

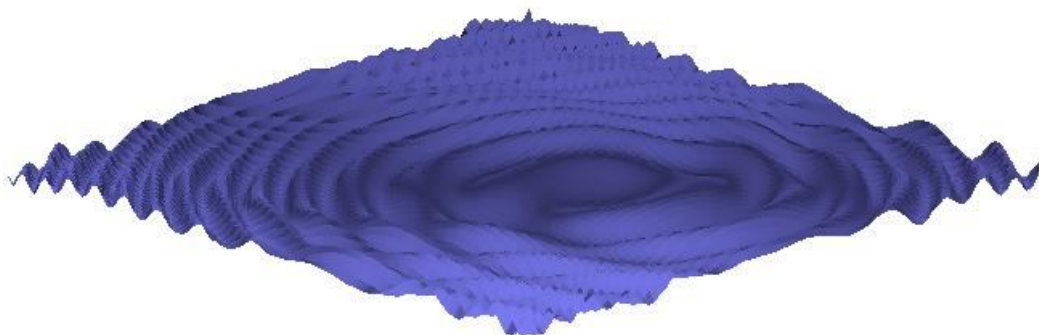
Senzor dnes patří mezi specialisty setrvačního a navigačního řízení. Díky tomu je používán především ve vojenské technice, ale své místo nachází i v civilních aplikacích. Jeho typické využití je v leteckém, námořním a navigačním průmyslu. Mezi jeho velmi cennou vlastnost patří velká přesnost a vysoká dlouhodobá stabilita.

2 Interference

Pokud se prostředím šíří více vlnění z různých zdrojů, šíří se každé vlnění tak, jako by žádná jiná vlnění v daném prostředí neexistovala. Jedná se o princip nezávislosti šíření vln. Avšak v místech, kde se tyto vlnění vzájemně setkají, vznikne jedno výsledné vlnění. Tento jev, při kterém dojde ke skládání dvou nebo více vlnění, nazýváme interference vlnění. Výsledné kmitání bodu v daném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění. V důsledku toho může při interferenci vlnění dojít v některých místech ke zvětšení (zesílení) amplitudy, v jiných místech naopak k jejímu zmenšení (zeslabení). [1]



Obr. 2.1: Interference rovinných vln [2]



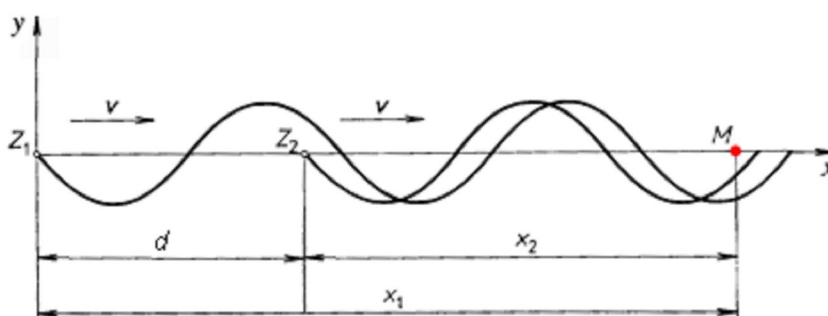
Obr. 2.2: Interference kruhových vln [2]

Nejjednodušší příklad interference nastává při skládání dvou postupných příčných vln se stejnou amplitudou výchylky y_m , která se šíří stejnou rychlostí v . Budeme tedy tato vlnění uvažovat. Zdroje vlnění Z_1 a Z_2 mají různou polohu, ale kmitají se stejnou počáteční fází. Vzhledem k bodu M můžeme složky vlnění popsat rovnicemi [1]:

$$y_1 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right), \quad (1)$$

$$y_2 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right), \quad (2)$$

kde λ je vlnová délka vlny, T je perioda vlny, x_1 je vzdálenost zdroje Z_1 od bodu M a x_2 je vzdálenost zdroje Z_2 od bodu M [3].



Obr. 2.3: Příklad dvou postupných příčných vln [3]

Okamžitou výchylku výsledného vlnění získáme superpozicí obou vln $y = y_1 + y_2$, která po dosazení má následující tvar [3]:

$$y = y_m \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \right] = 2y_m \cos \frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2 + x_1}{2\lambda} \right), \quad (3)$$

Pokud označíme d jako dráhový rozdíl vlnění, který určuje vzdálenost dvou bodů, v nichž mají obě vlnění stejnou fázi, bude rovnice pro okamžitou výchylku výsledného vlnění ve tvaru [3]:

$$y = 2y_m \cos \pi \frac{d}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (4)$$

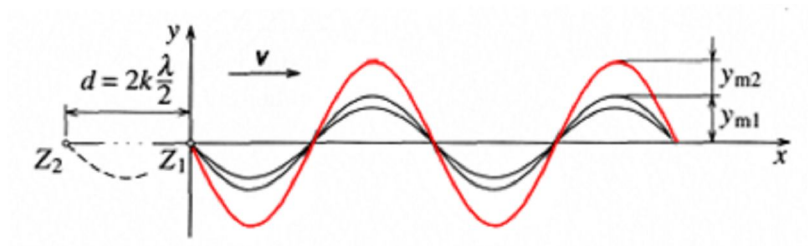
V této rovnici je výraz $2y \cos(\pi d / \lambda)$ konstantní, nezávislý na čase, ale závislý na dráhovém rozdílu d . Má význam amplitudy, můžeme jej tedy označit Y a rovnici výsledného postupného vlnění zapíšeme ve zjednodušeném tvaru [3]:

$$y = Y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (5)$$

Dráhový rozdíl je funkcí fázového rozdílu vlnění $\Delta\varphi$. Ten se dá určit jako rozdíl fází obou vlnění v určitém okamžiku: [1]

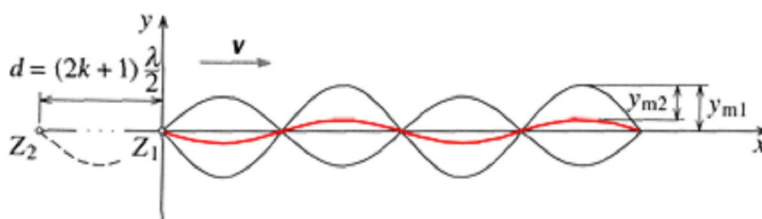
$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda} d. \quad (6)$$

Z rovnice vyplývá, že fázový rozdíl je přímo úměrný dráhovému rozdílu vlnění. Pokud je dráhový rozdíl roven sudému počtu půlvln, tedy $d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$ setkávají se interferující vlnění v každém bodě se stejnou fází a vzniklé vlnění má amplitudu výchylky rovnou součtu amplitud dílčích složek: $y_m = y_{m1} + y_{m2}$. Vzniká interferenční maximum, jedná se tak o interferenci konstruktivní [3].



Obr. 2.4: Vznik interferenčního maxima [3]

Pokud je dráhový rozdíl roven lichému počtu půlvln, tedy $d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$ setkávají se interferující vlnění s opačnou fází a vzniklé vlnění má amplitudu výchylky rovnou absolutní hodnotě rozdílů amplitud dílčích složek: $y_m = |y_{m1} + y_{m2}|$. Vzniká interferenční minimum, jedná se o interferenci destruktivní [1].



Obr. 2.5: Vznik interferenčního minima [3]

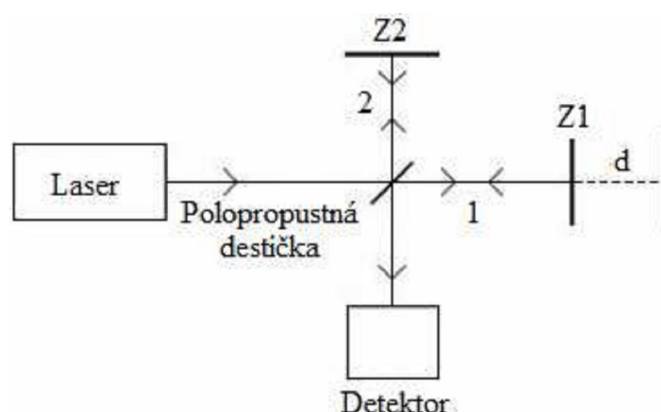
3 Interferometr

Optické interferometry jsou přístroje pro velmi přesná měření, jejichž princip je založen na interferenci světla. Interferometry se dnes používají k měření délek (interferenční komparátory), k studování různých povrchů, k měření tlaku a teploty plynů nebo plazmatu, k určení indexů lomu u plynů a kapalin (interferenční refraktometry), k určení struktury spektrálních čar (interferenční spektroskopy), k měření elektrického a magnetického pole, k měření rychlosti otáčení, k měření úhlového průměru hvězd a jako detekce gravitačních vln. Jednotlivé interferometry dělíme podle počtu interferujících vln na dvousvazkové interferometry a vícesvazkové interferometry. Nejznámějšími dvousvazkovými interferometry jsou Michelsonův, Mach-Zehnderův, Sagnacův a Fizeaův interferometr. Nejznámějším vícesvazkovým interferometrem je Fabry-Perotův interferometr [4].

Interferometrické měření vyžaduje, aby někde v prostoru byly přítomny současně dvě nebo více optických vln, výsledná vlnová funkce je pak součtem jednotlivých vlnových funkcí. Výsledná intenzita, ale nemusí být nutně součtem jejich jednotlivých intenzit. Důvodem tohoto rozdílu je interference mezi těmito vlnami [4].

3.1 Michelsonův interferometr

V roce 1881 americký fyzik polského původu Albert Abraham Michelson navrhl a sestavil interferometr. Původně ho navrhl jako prostředek ke studování éteru, který byl v té době předmětem rozličných názorů [5]. Princip interferometru je znázorněn na obrázku Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Michelsonův interferometr [3]

Posunem zrcadla Z_1 se změní velikost dráhy paprsku 1. Jelikož paprsek projde dráhu d dvakrát (tam a zpět), posunutím Z_1 o $1/4 \lambda$ směrem k polopropustné destičce se optická dráha paprsku

zmenší o $1/2 \lambda$. Tím se také změní interferenční obrazec tak, že kroužky maxima budou na místě minima. Posuneme-li zrcadlo Z_I o dalších $1/4 \lambda$ směrem k polopropustné destičce, kroužky maxima a minima se dostanou do své původní polohy.

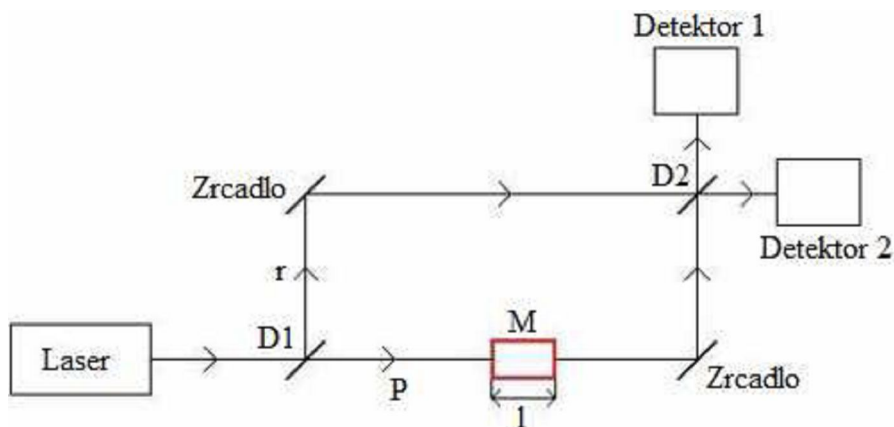
Pomalým posunem zrcadla Z_I o vzdálenost d se počet kroužků změní o N , můžeme potom vlnovou délku laseru λ vyjádřit vztahem:

$$\lambda = \frac{2d}{N} \quad (7)$$

Změnou počtu kroužků rozumíme počet změn z minima na maximum a následně opět na minimum nebo opačně [5].

3.2 Mach-Zehnderův interferometr

Tento interferometr zkonstruovali v roce 1891 Ludwig Mach a Ludwig Zehnder. Jeho schéma je zobrazeno na obrázku (Obr. 3.2).

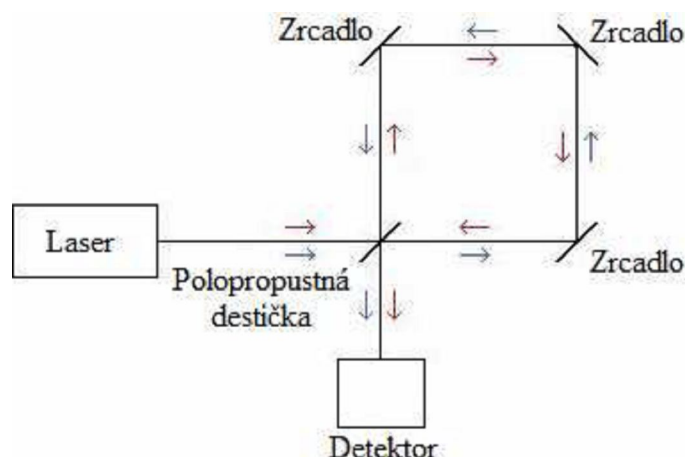


Obr. 3.2: Mach-Zehnderův interferometr [3]

Mach-Zehnderův interferometr se používá k přesným měřením transparentních objektů, avšak není tak citlivý jako Michelsonův interferometr, u kterého prochází předmětový svazek měřeným prostorem dvakrát. Měřicí prostor lze umístit do dostatečné vzdálenosti od optických prvků a od referenčního svazku, a proto lze toto zařízení používat i pro výzkum objektů generujících do okolí tepelné záření. Nevýhodou tohoto interferometru je nutnost použít vysoce kvalitní čočky, zrcadla a polopropustné destičky. [3]

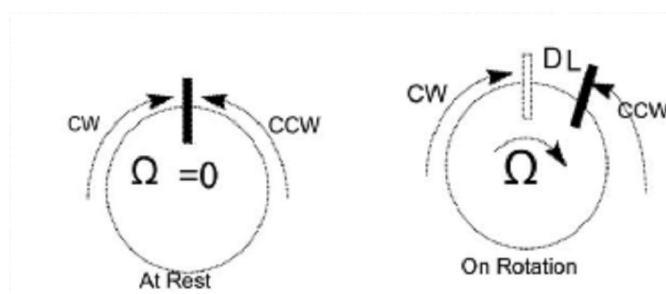
3.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr vynalezl francouzský fyzik Georges Sagnac v roce 1913. Princip interferometru je zobrazen na obrázku (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Sagnacův interferometr [3]

Světelný paprsek z monochromatického světelného zdroje dopadne na polopropustnou destičku, kde se rozdělí na dva paprsky. Jeden paprsek projde přes tuto destičku a poté se odráží od zrcadel ve směru hodinových ručiček. Druhý paprsek se od polopropustné destičky odrazí a dále se odráží od zrcadel proti směru hodinových ručiček. Dráhy, které paprsky urazí, jsou stejné, tyto paprsky tedy spolu interferují se stejnou fází. Pokud se však interferometr bude otáčet, paprsek jdoucí v opačném směru, než je otáčení, urazí menší vzdálenost, než paprsek jdoucí ve směru otáčení. Paprsky spolu budou interferovat s jinou fází. [6]



Obr. 3.4: Rotace cívky [19]

Když je systém v klidu, světlo se šíří ve směru hodinových ručiček (CW) a proti směru hodinových ručiček (CCW). V tomto klidovém režimu mají stejné cesty, takže mezi nimi není žádný fázový rozdíl [19].

Když se systém otáčí úhlovou rychlostí Ω , cesta CW bude o $\frac{LR\Omega}{c}$ delší a cesta CCW bude kratší o $\frac{LR\Omega}{c}$. (Obr. 3.4).

4 Rotační pohyb

Rotace (nebo též rotační nebo otáčivý pohyb), čili otáčení, je takový pohyb tuhého tělesa, při kterém se všechny body tělesa otáčejí kolem jedné společné osy se stejnou úhlovou rychlostí. Otáčivý pohyb může vykonávat i těleso, které není tuhé, pak mluvíme například o diferenciální rotaci. Trajektoriemi jednotlivých bodů tělesa jsou soustředné kružnice.

Kinetická energie E_k tuhého tělesa při otáčivém pohybu je rovna

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad (8)$$

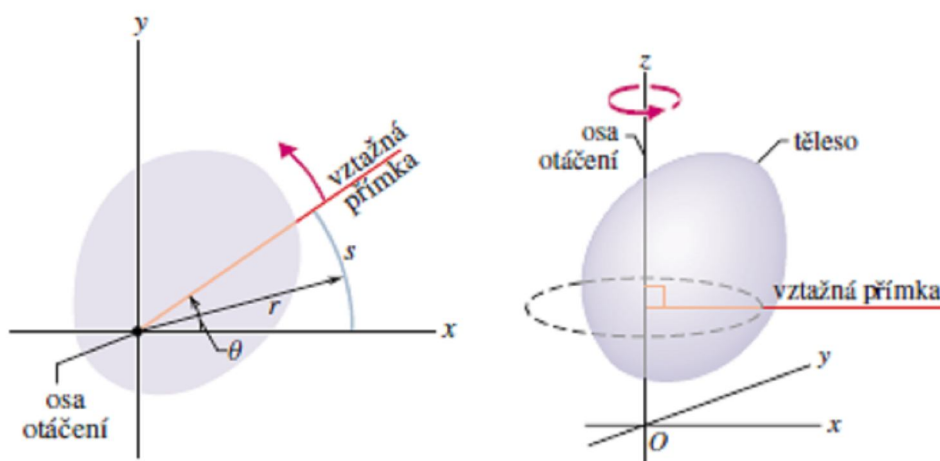
kde J je moment setrvačnosti tělesa vzhledem k ose otáčení a ω je úhlová rychlost, se kterou se těleso otáčí [7].

4.1 Úhlová poloha (dráha)

Úhlovou polohou budeme rozumět úhel, který vztažná přímka svírá s pevně zvoleným směrem ležící roviny kolmé k ose otáčení. Na Obr. 4.1 je úhlová poloha θ měřena vzhledem ke kladnému směru osy x . Pro uhel θ platí:

$$\theta = \frac{s}{r}. \quad (9)$$

Symbolem s jsme označili délku oblouku kružnice, který je ohraničen kladnou osou x a vztažnou přímkou, r je poloměr této kružnice [7].



Obr. 4.1: Měření úhlové polohy [7]

Obvod kružnice o poloměru r je $2\pi r$, takže jedna otáčka odpovídá změně úhlové polohy o 2π radiánů:

$$1ot = 360^\circ = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi * rad, \quad (10)$$

$$1rad = 57,3^\circ = 0,159 * ot. \quad (11)$$

4.2 Úhlová rychlost

Známe-li časovou závislost úhlové polohy $\theta(t)$, můžeme úhlovou rychlost ω snadno určit jejím derivováním

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}. \quad (12)$$

Rovnice platí nejen pro rotující tuhé těleso jako celek, ale také pro každou jeho částici. Jako jednotku úhlové rychlosti používáme nejčastěji radián za sekundu (rad/s), někdy i počet otáček za sekundu (ot/s).

Pohybuje-li se částice podél osy x , je její rychlost v_x kladná, nebo záporná podle toho, zda se pohyb děje ve směru rostoucí, nebo klesající souřadnice x . Také úhlová rychlost může mít kladné nebo záporné znaménko. V prvním případě se těleso otáčí ve směru rostoucího uhlu θ (proti směru otáčení hodinových ručiček), v druhém případě ve směru klesajícího uhlu θ (ve směru otáčení hodinových ručiček).

Předchozí definici ještě upřesníme: úhlovou rychlost rotujícího tělesa definujeme jako vektor ω rovnoběžný s osou otáčení. Velikost vektoru úhlové rychlosti značíme obvykle rovněž symbolem ω . Se slovním spojením „úhlová rychlost“ se tedy můžeme setkat dokonce v trojím významu. Může představovat vektor, jeho složku do osy rotace, či jeho velikost [7].

4.3 Úhlové zrychlení

V případech, kdy úhlová rychlost rotujícího tělesa není konstantní, má těleso nenulové úhlové zrychlení. Berme v úvahu, že úhlová rychlost tělesa v okamžiku t_1 je ω_1 a v okamžiku t_2 má hodnotu ω_2 . Průměrné úhlové zrychlení tělesa v časovém intervalu od t_1 do t_2 pak definujeme vztahem

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (13)$$

$\Delta\omega$ je změna úhlové rychlosti v daném časovém intervalu délky Δt . (Okamžité) úhlové zrychlení ε , je limitou průměrného úhlového zrychlení při poklesu hodnoty Δt k nule. Platí tedy

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (14)$$

Rovnice platí nejen pro rotující tuhé těleso jako celek, ale i pro každou jeho částici. Nejužívanější jednotkou úhlového zrychlení je radián za sekundu na druhou (rad/s^2), případně počet otáček za sekundu na druhou (ot/s^2). Podobně jako u úhlové rychlosti můžeme i zde zavést vektor úhlového zrychlení: $\varepsilon = \Delta\omega / \Delta t$. Jeho směr je dán osou a směrem otáčení [7].

4.4 Rovnoměrný pohyb po kružnici

Hmotný bod koná rovnoměrný pohyb po kružnici, jestliže ve stejných a libovolně malých časových intervalech opíše jeho průvodič stejné úhlové dráhy φ (θ).

Rovnoměrný pohyb po kružnici je pohyb periodický. Plný úhel $\varphi = 2\pi$ opíše hmotný bod vždy za stejnou dobu - oběžnou dobu (periodu) T . Perioda je doba, za kterou hmotný bod pohybující se po kružnici, vykoná právě jednu otáčku.

Dosadíme-li periodu do vztahu pro definici úhlové rychlosti, dostaneme $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T}$. Místo

periody můžeme pohyb po kružnici charakterizovat frekvencí f . Frekvence u pohybu hmotného bodu po kružnici udává počet otáček za jednotku času (většinou za sekundu).

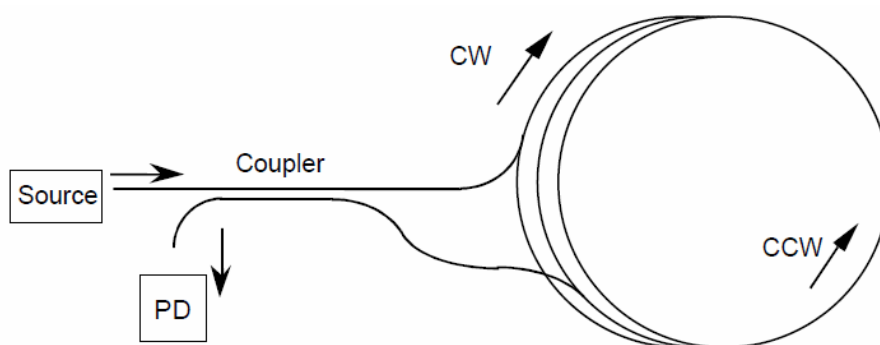
Mezi frekvencí f a periodou T platí vztah $f = \frac{1}{T}$. Jednotkou frekvence je s^{-1} . Lze též použít

jednotku hertz, přičemž platí: $1\text{s}^{-1} = 1\text{Hz}$. Úhlovou rychlost lze také vyjádřit pomocí frekvence f . $\omega = 2\pi f$ [7].

5 Konstrukce vláknového Sagnacova interferometru

5.1 Základní otevřená smyčka

Světlo ze zdroje prochází do 50% spojky, kde se dělí do dvou vln, které procházejí okolo vláknenné cívky v protilehlých směrech. Když se světlo vrací do spojky, vlny se slučují a rozdělují, polovina se vrací zpět do zdroje a polovina do detektoru. Intenzita světla v detektoru je míra interference mezi paprsky, a tudíž je úměrná rotaci cívky v její rovině. Protože se intenzita může také měnit z jiných příčin, např s teplotou, stejně jako odchylka ve výstupu světelného zdroje a nestabilita ve spojce, musí být vytvořena vhodná eliminace pro tyto efekty [20].



Obr. 5.1 Základní smyčka [27]

V základním uspořádání (Obr. 5.1) vzniká nevzájemnost (nerecipročnost), to znamená, že světelné vlny CW a CCW neurazily identické cesty, když se znovu spojily. Světlo ze zdroje je odráženo ve spojce, prochází CW okolo spojky, znovu je odráženo ve spojce a prochází do detektoru. Má tedy dva odrazy ve spojce. Druhý paprsek prochází spojkou, obíhá CCW, znovu prochází spojkou a poté prochází do detektoru. Pokud takto protisměrně se šířící vlny kumulují nevzájemné fázové posuny v důsledku optických složek nebo odchylek vyvolaných prostředím, objeví se chyby a fluktuace na nulovém bodě zcela zamaskuje posun Sagnacovy fáze. Další významné chyby jsou například způsobeny, pokud protisměrně se šířící vlny procházejí podél vlákna se stejným stavem polarizace a stejnou modální distribucí. Proto je třeba v dalších konstrukcích uvažovat speciální vlákna, modální optické filtry, popřípadě další polarizační prvky, abychom dosáhli polarizace [27], [16].

Jednoduchý polarizační interferometr je získán použitím vysoce dvojlomného vlákna pro měřicí cívku s jedním nebo mnoha polarizátory. V jiné typické realizaci je použito jednovidové nízkodvojlomné vlákno a musí být zamezeno dvojlomnosti vyvolané ohýbáním.

V obou případech minimalizují nevláknové polarizátory výměnu výkonu mezi polarizací způsobenou zbytkovými dvojlomnými fluktuacemi. Je doporučeno použití vševláknových složek k eliminaci odrazů a modální konverze, ke které běžně dochází na rozhraní hromadně zpracovávaných optických složek [27].

Citlivost lze jednoduše zvyšovat nebo snižovat změnou oblasti snímací cívky. Tato geometrická flexibilita je důležitá technologie I-FOG, jelikož stejné složky a montážní techniky mohou být použity pro různé přístroje bez nutnosti nového designu [27].

5.2 Základní otevřená smyčka se vzájemností

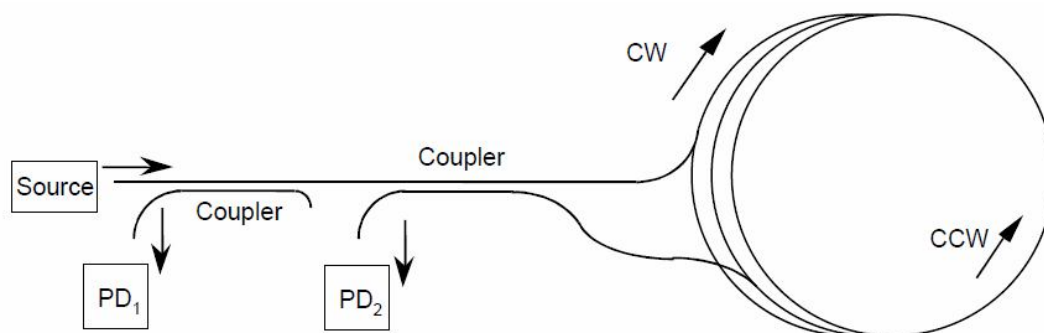
Smysl této konstrukce je vypořádat se s nevzájemností (nereciprocitou) obvodu. Vzájemnost požaduje, aby se vlny šířily symetricky všemi optickými složkami. Tuto skutečnost lze elegantně vyřešit zavedením druhé spojky. Nyní každá vlna prochází v jedné spojkce křížově a v druhé mřížově, jak je ilustrováno na obrázku (Obr. 5.2). Zde užitečný signál I_1 fotodiodou 1 je dán [27]:

$$I_1 = I_{01}(1 - \cos \phi_s), \quad (15)$$

a signál I_2 z fotodiody 2 je dán:

$$I_2 = I_{02}(1 + \cos \phi_s). \quad (16)$$

Tímto uspořádáním se oproti předešlému zapojení zvyšuje výkon a citlivost snímače [27].

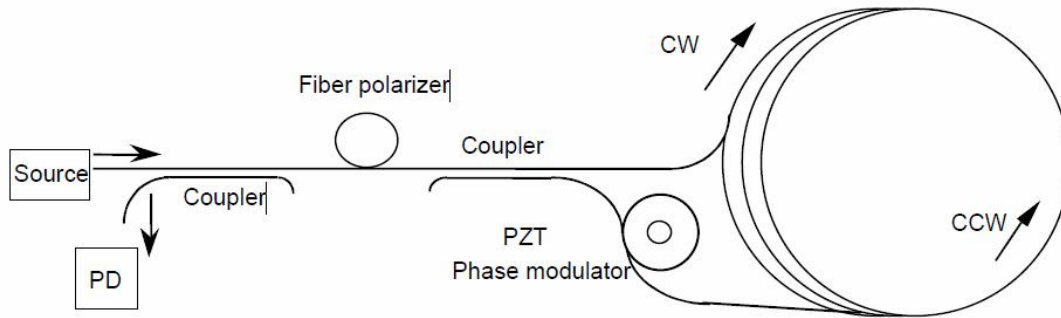


Obr. 5.2 Konfigurace se dvěma spojkami [27]

5.3 Konfigurace otevřené smyčky s fázovou modulací

Hlavní problém základních konfigurací představovaných na obrázcích (Obr. 5.1 a Obr. 5.2) je výstupní nelinearita, která zamezuje měření vysoké citlivosti malých rotačních úhlů bez znakové nejednoznačnosti. Toto omezení je překonáno transformováním širokopásmové

závislosti cosinu do sinusové funkce. Typické nastavení praktické FOG v optovláknové technologii je znázorněno na obrázku (Obr. 5.3), kde je vložen fázový modulátor do vlákné cívky blízko výstupu spojky tak, že je protisměrně se šířícími vlnami nakumulováno různé fázové zpoždění. Vše vláknový fázový modulátor je sestaven vinutím a cementováním několika vláknových otáček na krátkou, dutou piezokeramickou trubičku (PZT). Aplikováním PZT do modulujícího napětí jsou vytvořeny radiální elastické napětí a následná odchylka v délce cesty v důsledku elasticky optického efektu [27], [28] .



Obr. 5.3 Gyroskop s fázovým modulátorem [27]

Jako výsledek se setkávají šířící se vlny CCW a CW s fázovým zpožděním $\Phi(t)$ a $\Phi(t+\tau)$ v tomto uvedeném pořadí, kde $\tau = \frac{L}{v}$ je radiační tranzitní čas ve vlákně celkové délky L .

Relativní fázový rozdíl na detektoru je poté

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \phi_S + \Phi(t) - \Phi(t + \tau), \quad (17)$$

což může být také zapsáno jako

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \phi_S + \Phi(t - \tau / 2) - \Phi(t + \tau / 2). \quad (18)$$

Použití fázové modulace v úhlové frekvenci ω_m

$$\Phi(t) = \phi_S + \Phi_{mo} * \cos(\omega_m t) \quad (19)$$

vyvolává

$$\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \phi_S + 2\Phi_{mo} \sin \omega_m \frac{\tau}{2} \sin \omega_m t = \phi_S + \Phi_m \sin \omega_m t, \quad (20)$$

kde amplituda

$$\Phi_m = 2\Phi_{mo} \sin \omega_m \frac{\tau}{2} \sin \omega_m t \quad (21)$$

může být maximalizována vybráním modulační frekvence PZT

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{1}{2\tau}. \quad (22)$$

Fotodetekovaný signál I_1 potom bude

$$I_1 = I_{01}[(1 + \cos(\Phi_{CCW} - \Phi_{CW} = \Delta\Phi))]. \quad (23)$$

Výstupní signál vláknového gyroskopu je výsledkem interference dvou vln, kde I_{01} je okrajová amplituda a $\Delta\Phi$ je fázový rozdíl mezi dvěma rušivými (interferenčními) vlnami. Tento typ signálu má počet nedostatků závisících na aplikaci. Za prvé, výstupní signál je nelineární funkce poměru rotace s dynamickou škálou omezenou tvarovým sinusovým kmitem. Za předpokladu citlivosti měření 10^{-7} rad získáme dynamickou škálu v řádu 10^7 . Některé aplikace vyžadují dynamickou škálu 10^8 a více. Za druhé, výstupní signál je ve formě analogového elektrického proudu, který jako důsledek velkého množství informací není jednoduché digitalizovat pro zpracování. A tak tento typ gyroskopu je nesnadné používat v inerciálním referenčním systému, kde údaje ze tří gyroskopů musí být současně analyzovány. Za třetí, stability množství I_{01} a $\Delta\Phi$ jsou diskutabilní. Okrajová amplituda I_{01} se různí spolu se zdrojem optické energie, se ztráty optické energie v systému a se stavy polarizace rušivých vln. Fázový rozdíl píšeme

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} * \frac{LD}{c} \Omega, \quad (24)$$

kde L je délka vlákna, D je průměr cívky vlákna, c je rychlost světla ve vakuu a λ střední vlnová délka zdroje [27], [19], [16].

Jiný a další zdroj chyb je zpětný rozptyl, který vyvolává přeslech mezi vlnami CW a CCW. Tento problém může být řešen použitím světelného zdroje s délkou velmi krátké soudržnosti, což zamezuje efektům bití mezi složkou zpětného rozptylu a spolu se šířící vlnou. Superluminiscenční dioda je tudíž nejlepší volba pro uspokojení tohoto požadavku a současně pro zajištění vysoké efektivity spojky v jednovidovém vlákně [27].

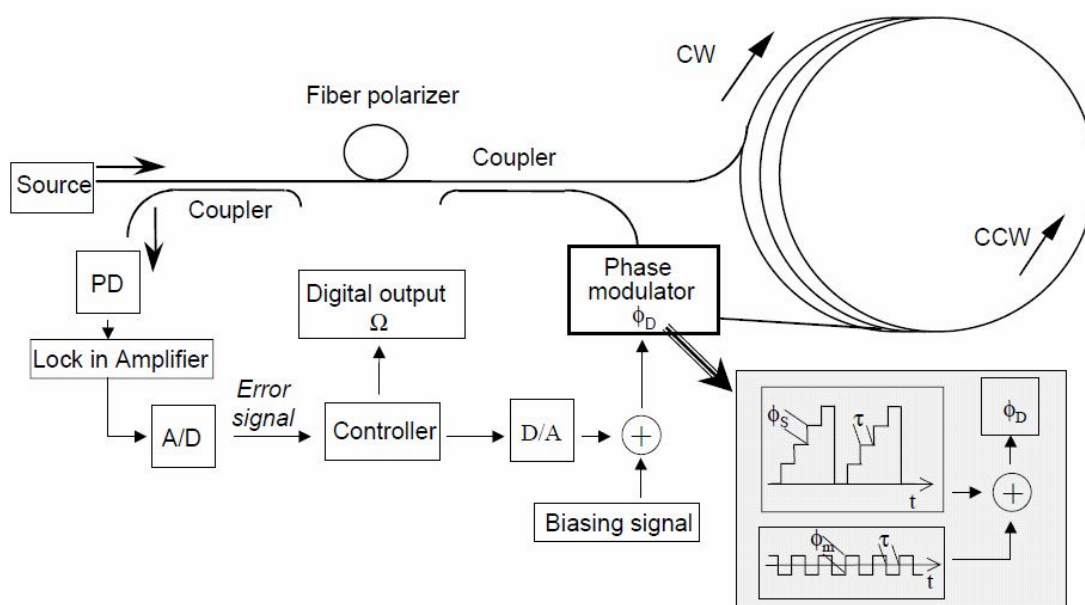
Dále je třeba mít na paměti magneticky-optický efekt Faraday v důsledku např. elektromagnetických interferencí, kdy je tento nevzájemný efekt potencionálně nebezpečný, pokud se přidá k Sagnacově efektu. Tento problém je nyní téměř vyřešen použitím pečlivě odtočených, polarizaci udržujících vláken. Podobně nevzájemnost vyvolaná nelineárním efektem Kerr může být silně omezena širokopásmovými, nízce soudržnými, nepolarizovanými optickými zdroji [16].

5.4 Konfigurace uzavřené smyčky

Program uzavřené smyčky byl navržen v různých provedeních pro řešení většiny z výše zmíněných problémů. Základní myšlenka se skládá z použití efektu zpětné vazby, který ruší posun Sagnacovy fáze přidáním řízeného fázového zpoždění, a tím je detekován přímo úměrně k rotační míře. Od té doby byl Sagnacův efekt představen jako Dopplerův efekt, operace uzavřené smyčky byla nejprve realizována vytvořením frekvenčního posunu za použití akusticko-optických modulátorů. Nicméně toto řešení nebylo v zachování vzájemnosti nejvhodnější. Eventuálně frekvenční odchylka simuluje modulaci fázové rampy, která musí být přenesena a synchronizována do dříve popsané předpět'ové fázové modulace [27] [16].

Analogové řešení, založené na analogové fázové rampě (také indikované jako serrodynová modulace), kromě sinusové předpět'ové modulace nepředstavuje velmi efektivní řešení. Velké zlepšení je získáno s digitálním přístupem založeným na předpět'ové modulaci čtvercové vlny a na digitální fázové rampě pro zpracování uzavřené smyčky [16].

Funkční blokový diagram této konfigurace je znázorněn na obrázku (Obr. 5.4).



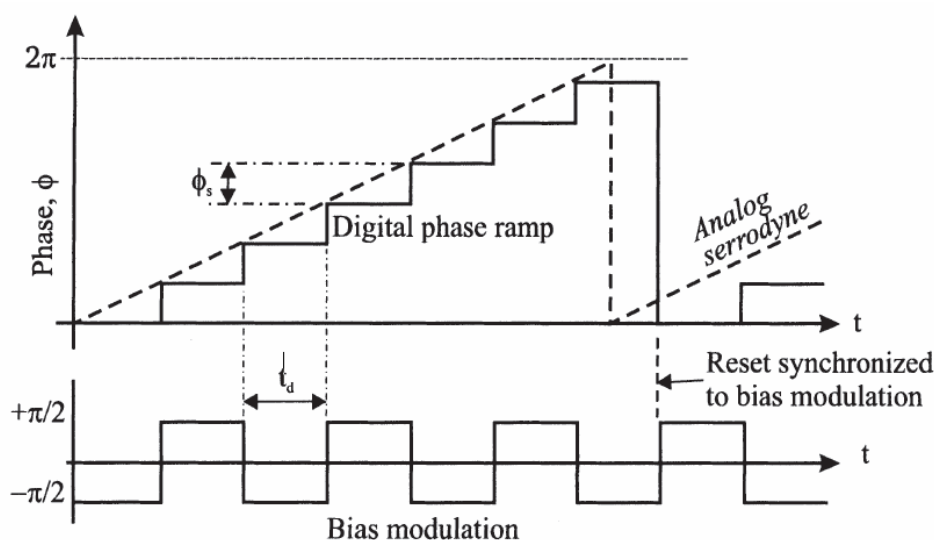
Obr. 5.4 Konfigurace uzavřené smyčky s digitální rampou [27]

V podstatě je smyčka digitální zpětné vazby přidána do struktury otevřené smyčky předtím znázorněné na obrázku (Obr. 5.3). Výstup zesilovače je předvedený, kvantovaný ve vzorku a vyvolává chybný signál, který je zachován blízko nuly digitální zpětnou vazbou. Frekvence odběru vzorků odpovídá převrácené hodnotě radiačního tranzitního času pro požadovanou

synchronizaci rampy a zkresleného signálu. Kontrolér pohání fázovou modulaci, takže vytváří fázové stupně amplitudy rovnající se posunu Sagnacovy fáze a době trvání. D/A konvertor automaticky vytváří reset rampy prostřednictvím přetoku. Resetový stupeň odpovídá fázové odchylce 2 radiánů za účelem získat vždy správný posun Sagnacovy fáze. V tomto programu je rotační míra získána přímo v digitálním formátu. Další výhoda této konfigurace, s ohledem na analogové řešení, je fázová stabilita během obnovení signálu [16].

Závěrem je třeba poukázat na to, že gyroskop uzavřené smyčky vyžaduje širokopásmovou fázovou modulaci. Místo používání pomalé, nespojitě PZT se upřednostňuje vytvořit modulátor v lithiové niobičnanové technologii tak, aby se na čipu integrovaly všechny požadované funkce (fázový modulátor, spojky). Tento přístup je použit několika výrobci také pro jednoduchou montáž [27] [16].

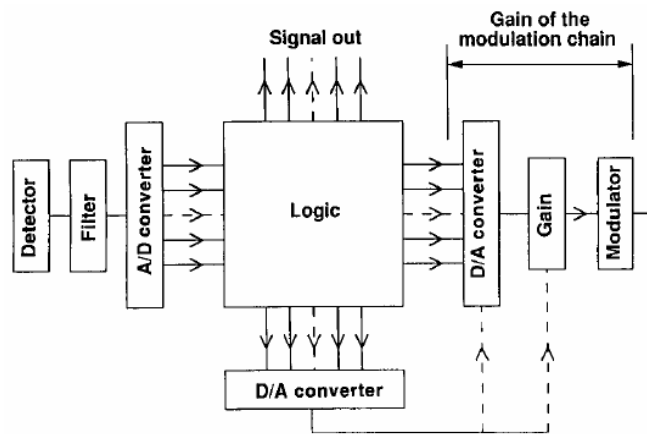
Obrázek Obr. 5.5) znázorňuje přístup digitální fázové rampy, který byl navržen pro vylepšení škálového faktoru linearitu fázového modulátoru. Místo rampy poskytuje modulátor stupně fáze s dobou t_d (tranzitní čas v cívce). Rampy jsou resetovány synchronně se zkreslenou modulací [16].



Obr. 5.5 Digitální rampa [16]

V souvislosti s touto digitální demulací vzniká metoda zpracování všech digitálních uzavřených smyček. Taková elektronika pracuje na frekvenci 0,1 MHz pro délku cívky 100-1000 m. Dále se skládá z detektoru, prostředků filtrování, přímé A/D konverze modulovaného signálu, digitálního obvodu zpracování (demodulace, integrační filtr pro uzavření smyčky, generace rampy zpětné vazby a zkreslená modulace), D/A konverze hnacího signálu

modulátoru a bufferového zesilovače. Konstruktor musí velmi opatrně zacházet s pozemními smyčkami a elektromagnetickými interferencemi mezi fázovými modulátory, které jsou poháněny několika volty a detektorem, kde limit citlivosti odpovídá primárnímu proudu menšímu než 10^{-12} ampérů, které budou demodulovány na stejné frekvenci. Kromě toho existuje druhý D/A převaděč pro dodatečnou řídicí smyčku zisku modulačního řetězce (Obr. 5.6). Tato druhá smyčka reguluje stav, aby se reset rampy rovnal 2π radiánům (doba fázové modulace) nebo může alternativně pracovat s tzv. 4-stavovou modulací [16].



Obr. 5.6 Digitální modulační řetězec [16]

5.5 FOG se spojkou 3x3

Alternativní konfigurace pro otáčení v závislosti \cos do požadovaného \sin u výstupu je použití vlákené optické spojky 3x3. Toto řešení nahrazuje fázový modulátor. Konstrukce je zobrazena na obrázku (Obr. 5.7). Za předpokladu dokonalé, bezztrátové spojky, která se rozděluje do tří rovných částí, vyvolávají některé geometrické faktory vstupní optický výkon (Obr. 5.8). Vztahy pro výstupní pole

$$E_D = \frac{1}{\sqrt{3}} E_0 e^{i(-90^\circ)}, \quad (25)$$

$$E_{1C} = E_{2C} = \frac{1}{\sqrt{3}} E_0 e^{i(30^\circ)}, \quad (26)$$

kde se dolní indexy D a C uvádí pro přímou a křížovou cestu a E_0 je vstupní pole. Jako všeobecné pravidlo platné pro výstupní pole spojky 3x3 shromažďuje přímé pole -90° fázové zpoždění, zatímco dvě křížová pole hromadí fázové zpoždění 30° s ohledem na vstup. Tyto vzorce jsou považovány za platné pro vstup na obou stranách spojky.

Po šíření jsou vlny spojeny spojkou a pole zasahující do fotodiod PD1 a PD2 jsou

$$E_{PD1} = E_{1CC} + E_{2CD} = \frac{1}{3}E_0e^{i(60^\circ+\varphi)} + \frac{1}{3}E_0e^{i(-60^\circ-\varphi)} \quad (27)$$

a

$$E_{PD1} = E_{1CD} + E_{2CC} = \frac{1}{3}E_0e^{i(-60^\circ+\varphi)} + \frac{1}{3}E_0e^{i(60^\circ-\varphi)}, \quad (28)$$

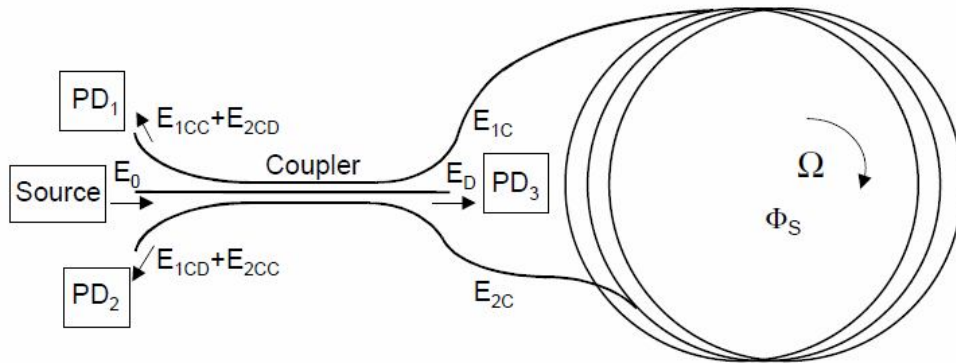
kde je vzat v úvahu posun Sagnacovy fáze kumulovaný okolo vláknenné smyčky, zatímco ztráty výkonu a jiné nevzájemné vlny jsou zanedbávány.

Fotogenerované proudy jsou dány

$$I_{PD1} = \frac{2}{9}\sigma P[1 + \cos(120^\circ + 2\phi)], \quad (29)$$

$$I_{PD2} = \frac{2}{9}\sigma P[1 + \cos(120^\circ - 2\phi)], \quad (30)$$

kde P je vstupní spuštený výkon.



Obr. 5.7 Gyroskop 3x3 [27]

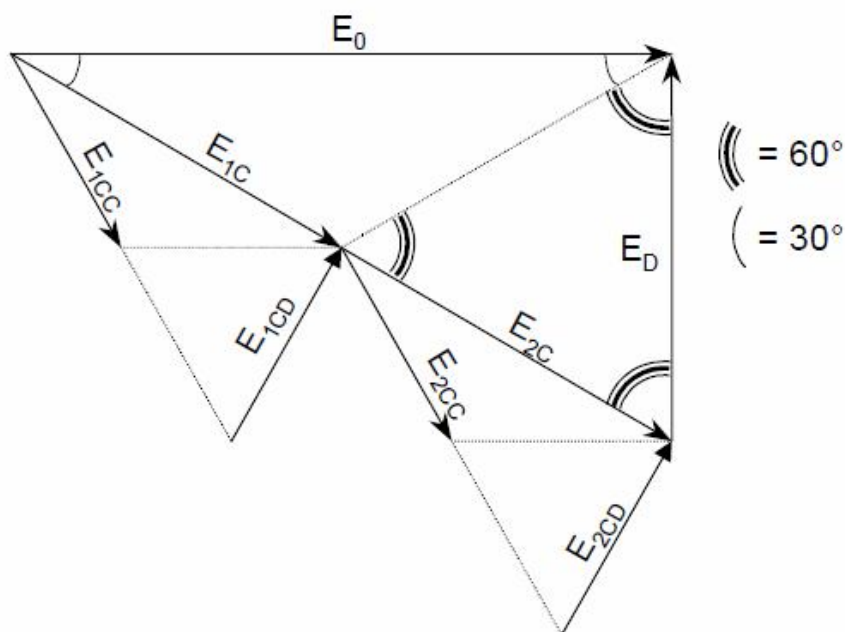
Diferenční výkon

$$I_{PD2} - I_{PD1} = \frac{2\sqrt{3}}{9}\sigma P[\sin(2\phi)] \quad (31)$$

je úměrný sinusu požadovaného fázového posunu. Třetí výstup spojky PD3 může být použit jako zdrojový monitor pro kompenzaci vstupních výkonových fluktuací [27].

Tento program není ve své podstatě vzájemný, jelikož optické paprsky CW a CCW se šíří spojkou s různě dlouhými cesty. Nicméně tato nevzájemnost může být tolerována v aplikacích s nízkou přesností, jako například v automobilovém oboru, kde je definitivně vyžadován nízkonákladový přístroj. Kromě eliminace fázového modulátoru je dosaženo dalšího snížení

nákladů použitím nenákladných standardních telekomunikačních vláknových a optických zdrojů s emisí v rozsahu 700 - 900 nm. Je tím získána jednovidová operace, jelikož vlákenná cívka se chová jako modální filtr. Problém okolních vibrací a přechodné teplotní jevy mohou být řešeny prostřednictvím depolarizátoru nízkonákladového vlákna. Typicky je tento program realizován vláknem dlouhým 150 m, navinutým na upínacím trnu vyvolávajícím posun Sagnacovy fáze $0,1^\circ$ pro rotační míru $1^\circ/\text{s}$, odpovídající lineárnímu signálu pro automobilovou dynamickou oblast. Chyba linearity bez elektronických oprav je menší než 0.5%, zatímco dlouhodobý posun výchozího bodu je $0.05/\text{s}$. [27]

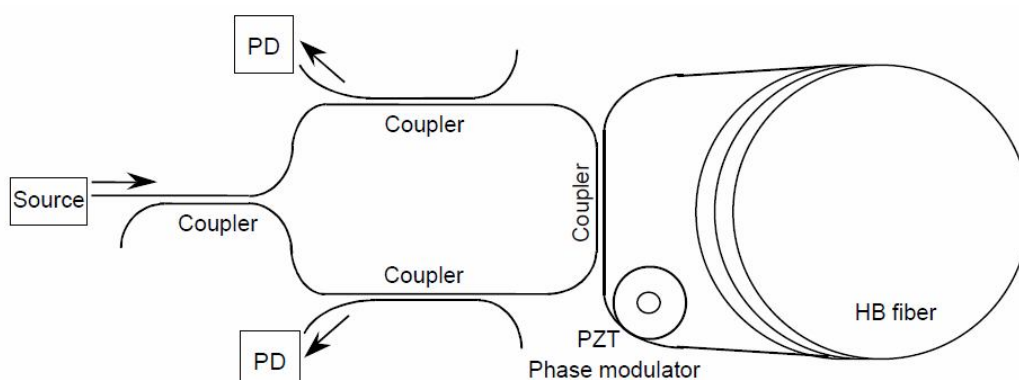


Obr. 5.8 Geometrická protihodnota [27]

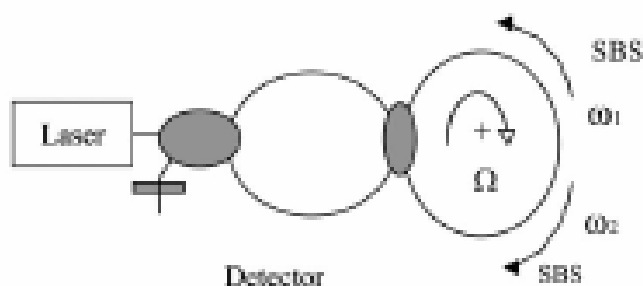
5.6 RFOG a RFLG

Vláknový optický kruhový rezonátorový gyroskop (RFOG) se skládá z recirkulované pasivní optické dutiny, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 5.9). Rezonanční frekvence dutiny je modulovaná úhlovou rotací. Změna v rezonanční frekvenci protisměrně se šířících vln se jednoduše transformuje do kolísání výstupního výkonu z otvoru 4vláknenné optické spojky. Tato konfigurace tudíž řídí kruhový vlákenný rezonátor vysoké jemnosti. Jelikož jemnost zvyšuje citlivost, dobré výkony mohou být získány s mnohem kratší vlákennou délkou. RFOG zachovává pasivní strukturu IFOG. V případě RFOG je ve snímání cívce použita kratší délka vlákna 5 – 10 m. Zdroj světla musí být vysoce koherentní laser [19], [27].

FRLG (Obr. 5.10) (vláknový kruhový laserový gyroskop) využívá vláken dopovaných vzácnou zeminou jako aktivního média udržujícího laserovou oscilaci ve snímací cívce. Konfigurace je podobná RFOG (Obr. 5.9), ale nyní je spojka WDM (multiplexor dělení vlnové délky) vlákněná spojka uspořádaná tak, aby protнула výkon čerpadla (ve vlnové délce) z externí laserové diody a ke zrušení oscilačního pole v kruhu. Tímto způsobem může být získána velmi vysoká kruhová jemnost. Kontrolováním oscilačních vidů je sledována pracovní situace podobná He-Ne RLG. Nicméně nedokonalost vlákna dosud zamezila dosažení citlivostí stupně letecké elektrotechniky [19], [27].



Obr. 5.9 RFOG [27]

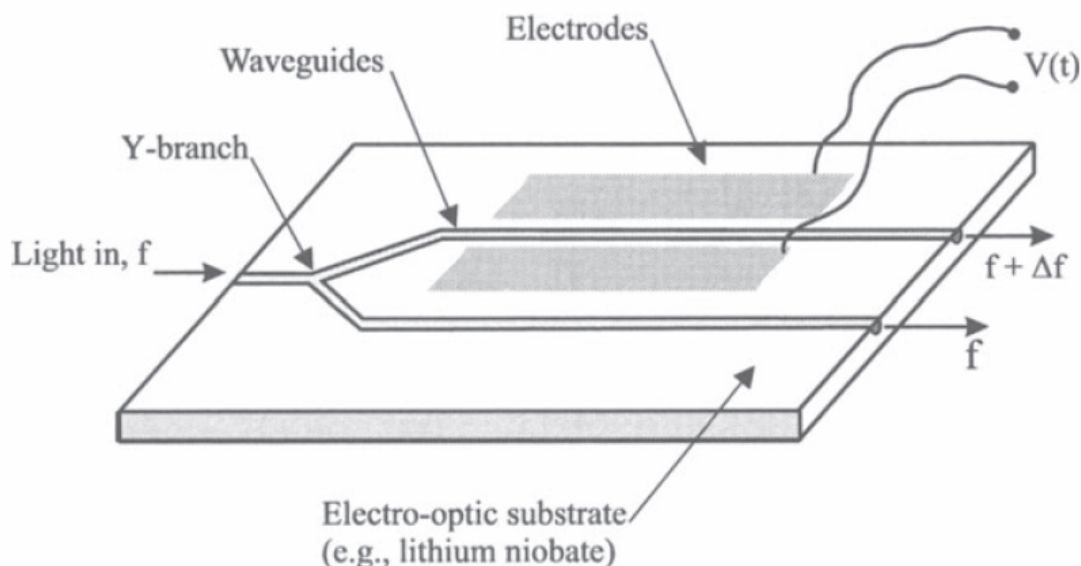


Obr. 5.10 FRLG [19]

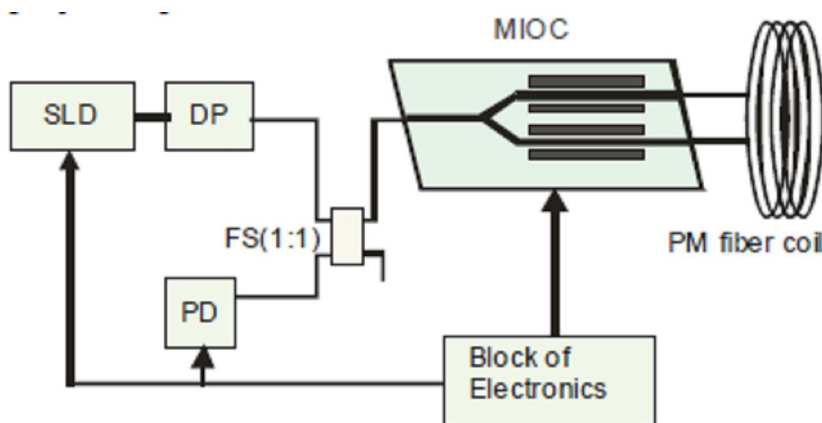
5.7 Integrovaný optický gyroskop

Řešení integrované optiky nabízí možnost velkovýroby komponentů a tudíž i nízké náklady. Za účelem modulování světla je v řešení integrované optiky použit aktivní elektro-optický krystal. Nejčastěji používaný je niobičnan lithia. Vlnovody jsou vytvořeny z niobičnanu lithia rozptýlením titanu do povrchu krystalu v pruzích širokých a hlubokých 3-6 μm . Tyto uvnitř krystalu rozptýlené oblasti mají vyšší index, aby se chovaly jako vlnovody. Základní modulátor je načrtnut na obrázku (Obr. 5.11). Příčné pole, které vychází z elektrod nanesených na substrátu, je úměrné napětí. Integrovaná optika zahrnuje zpracování světelných vln

modulátorem, zapínači a zesilovači v přístrojích vytvořených na stejném substrátu. Polarizátory integrované optiky využívají rozdíly mezi tzv. kvazi-TE a TM vedených vidů. [28]



Obr. 5.11 Integrovaný Y [28]



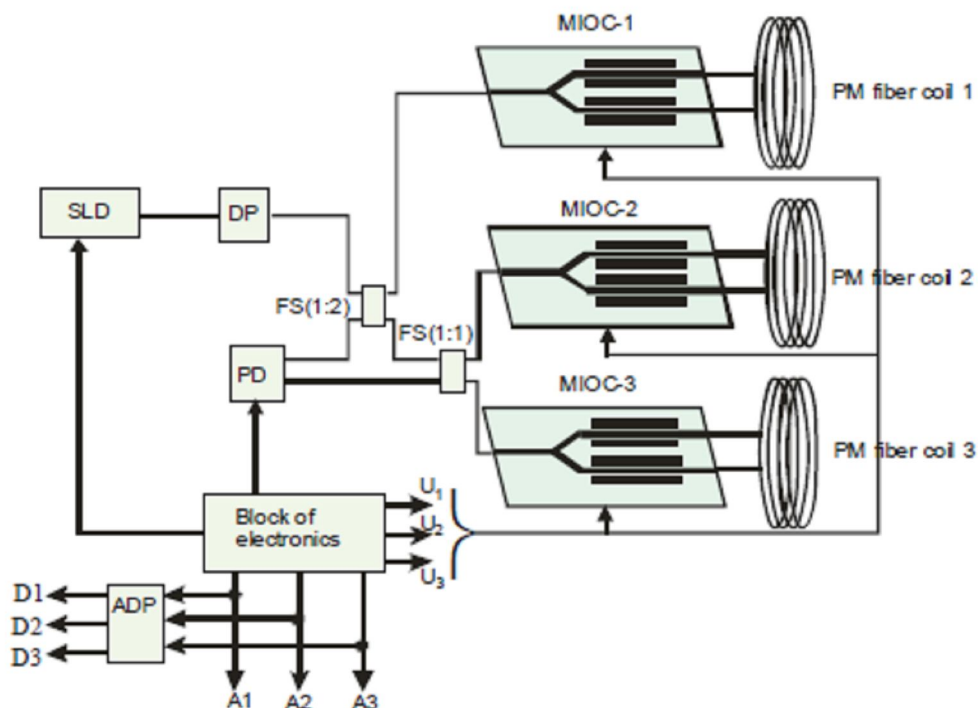
Obr. 5.12 Ukázka použití integrované optiky [26]

5.8 Třiosá konfigurace

Třiosé FOG mají minimální konfiguraci (Obr. 5.13), které poskytují vzájemné optické cesty pro dva protisměrně se šířící paprsky ve vlákenné smyčce. FOG se skládá z jednoho světelného zdroje, jednoho fotodetektoru, dvou vlákenných děličů pro rozdělení světla do tří částí, tři

kruhových interferometrů pro určení tří ortogonálních úhlových frekvencí a tištěných obvodových desek nainstalovaných obvodů zpracovávajících signál.

Blok elektroniky vytvořil tři napětí, a to U_1 , U_2 a U_3 pro fázovou modulaci s pilovým zubem pro kompenzaci Sagnacovy fáze stejně jako pro vytvoření konstantního fázového rozdílu mezi dvěma vlnami. [26]



Obr. 5.13 Tříosá konfigurace [26]

V tomto případě je měřená rotace určena jako následující

$$\Omega = \frac{n\lambda}{\pi D} \varphi * f, \quad (32)$$

kde φ je amplituda a f je frekvence pilového zubu. V naší tříosé FOG je frekvence stabilizována křemenným rezonátorem tak, že $f = \text{const}$. Proto může být rotační míra určena měřením amplitudy pilového zubu

$$\varphi = \frac{\pi D}{n\lambda f} \Omega. \quad (33)$$

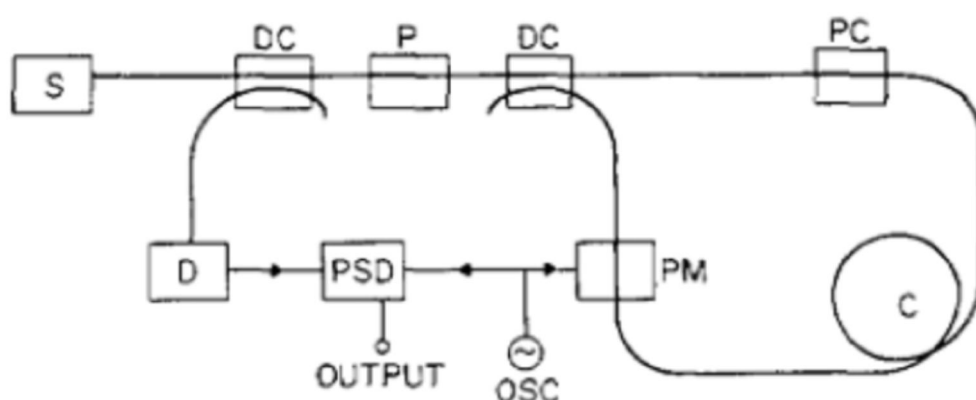
Tato hodnota je určena měřením napětí U , které vytváří tuto amplitudu pilového zubu. Hlavním problémem této konfigurace je elektronický šum na IO-modulátoru, který může vytvořit zkreslení. Filtrování je velmi omezené, protože požadovaná vysoká šířka vlnového pásma je 100 MHz pro modulaci [26], [20].

6 Realizace optovláknového snímače

6.1 Zvolená konfigurace

Nabízí se mnoho možností ve výběru konfigurace optovláknového interferometru. Jedním z cílů práce je sestavit takový snímač, který bude mít další využití v rámci laboratorních cvičení pro studenty. Z tohoto pohledu je třeba, aby byl snímač „otevřený“. Proto nechceme použít integrovanou optiku. Na snímač klademe nároky minimální konfigurace, ale zároveň zdárného sestavení a vyhodnocení signálu. Není tedy vhodné vybrat základní uspořádání, kde bychom se potýkali s problémem nreciprocitivity. Zvolil jsem proto konfiguraci otevřené smyčky s fázovou modulací.

Schéma zapojení:



Obr. 6.1: Blokové schéma snímače [20]

S...světelný zdroj

DC...svazkový dělič

P...polarizátor

PC...kontrolér polarizace

C...cívka s navinutým vláknem

PM...fázový modulátor

OSC...oscilátor

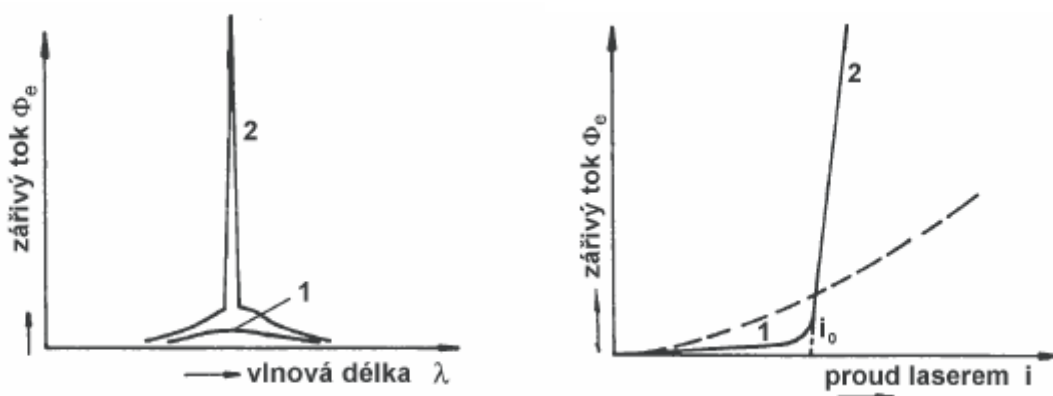
PSD...zesilovač

6.2 Světelný zdroj (S)

Laser je optický zdroj elektromagnetického záření, vyzařující světlo v úzkém svazku paprsků, které je na rozdíl od obyčejného světla koherentní a monochromatické. Obyčejné světlo je vyzařováno z různých zdrojů, jako jsou například Slunce, otevřený oheň, žárovky, zářivky, výbojky nebo luminiscenční diody [14].

Laser na rozdíl od těchto zdrojů vyzařuje světlo, které má minimální, téměř nulovou rozbíhavost (koherence) a jeho světlo je tvořeno pouze jednou barvou, tedy světlem o stejné vlnové délce [10].

Výběr správného zdroje světla pro konstrukci interferometru je jedním z nejdůležitějších aspektů. Od daného zdroje světla se bude nadále odvíjet samotná konstrukce interferometru, a tudíž i výběr jednotlivých komponentů. Jedna z variant je použití He-Ne laseru. Tento laser disponuje velice dobrými vlastnostmi – vysoká koherence světla (stejná frekvence vlnění, stejný směr kmitání a ve stejné fázi), nízká rozbíhavost světelného svazku a monochromaticnost (jednobarevné světlo o konstantní amplitudě elektrické intenzity o jediné frekvenci). U této varianty by byl vyvolán zpětný rozptyl, který vyvolává přeslech mezi vlnami CW a CCW. Proto použijeme světelný zdroj s délkou velmi krátké soudržnosti, což zamezuje efektům bití mezi složkou zpětného rozptylu a spolu šířící se vlnou. Použijeme proto polovodičový laser, který touto vlastností nižší koherence disponuje. Budeme pracovat na vlnové délce 1310 nm.



Obr. 6.2: Závislosti polovodičového laseru [11]

Polovodičový injekční laser (laserová dioda) je čerpán elektrickým proudem procházejícím P – N přechodem v propustném směru. Při průchodu proudu polovodičovým laserem vzniká při nízkých hodnotách proudu v oblasti přechodu pouze spontánní emise, tj. laser pracuje prozatím jen jako obyčejná elektroluminiscenční dioda. Emisní spektrum vysílaného záření je poměrně široké. Při zvyšování hodnoty proudu se zvyšuje koeficient zisku g a překročí-li proud určitou kritickou hodnotu i_0 , nastupuje zesílení záření stimulovanou emisí, tj. laserová dioda začíná pracovat jako skutečný laser. Proud i_0 se nazývá prahový proud. [11]

Zvolený laser **Fotodioda LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0:**

| Fotodioda LASER COMPONENTS PDINP075ST83-Z-0 (T _p = 25 °C) | | | | | |
|--|--|-------------|------|------|----------|
| Parametr | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Jednotka |
| Proud v propustném směru | I _F | 10 | | | mA |
| Napětí v závěrném směru | U _R | 20 | | | V |
| Proud v závěrném směru | I _R | 2 | | | mA |
| Citlivost | S | 0,8 | 0,9 | - | A / W |
| Citlivost v oblasti vlnových délek | λ | 1295 - 1325 | | | nm |
| Provozní vlastnosti - PDINP075ST83-Z-0 | | | | | |
| Parametr | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Jednotka |
| Provozní rozsah teplot | ΔT _p | - 40 ~ + 85 | | | °C |
| Konstrukční vlastnosti - PDINP075ST83-Z-0 | | | | | |
| Provedení | konektorovaná (ST) pro SM nebo MM optická vlákna | | | | |

Obr. 6.3: Technická specifikace laseru [18]



Obr. 6.4: Světelný zdroj [18]

6.3 Dělič (DC)

Děliče svazků představují jeden z velmi významných optických elementů. Tyto pasivní součástky umožňují rozštěpit dopadajícího vstupního optického svazku na dva a více dílčích sekundárních svazků. Intenzita dopadajícího optického svazku je potom vždy větší či rovna součtu intenzit výsledných sekundárních svazků [12]. Jeho dělicí poměr je dán jeho konstrukcí. Vyrábí se i děliče s proměnným poměrem. Použijeme oba děliče s pevným poměrem 1:1.

Vybraný dělič **Thorlabs 10202A-50-APC - 2x2 SM Coupler**



Obr. 6.5: Dělič [22]

Technická specifikace:

- vlnová délka 1310 – 1550 nm \pm 40 nm
- vazební poměr 50:50
- vložené ztráty 3.8:3.8 dB
- nadměrné ztráty 0,2 dB
- polarizační ztráty <0,15 dB
- směrovost >60 dB
- pracovní teplota -40 až 80 °C
- typ vlákna SMF-28e+
- konektor FC/PC, FC/APC

6.4 Polarizační prvky

Během šíření světelného paprsku se mění intenzita elektrického a magnetického pole.

Vektor intenzity E elektrického pole je vždy kolmý na směr, kterým se vlnění šíří. V rovině kolmé k paprsku přirozeného světla se směr vektoru E nahodile mění. Takové světelné vlnění označujeme jako nepolarizované světlo. Světelné vlnění, jehož vektor E kmitá stále v jednom směru, se nazývá lineárně polarizované světlo [13].

Změna polarizace by měla za následek odchylky rychlosti šíření světla vláknem a nebylo by tedy možné dosáhnout, aby proti sobě se šířící světelné svazky vykonávaly při nulové úhlové rychlosti identickou optickou dráhu.

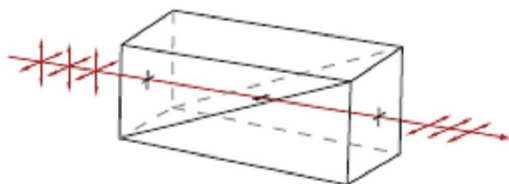
Vzájemný chod I-FOG nevyžaduje nepřetržité jednovidové šíření, ale pouze jednovidové filtrování. Jednovidová vlákna jsou ve skutečnosti vlákna dvojího polarizačního módu. Použití polarizačních prvků vlákna tedy zlepšuje výkon přístroje a ruší doznívání signálu.

Použité polarizační prvky jsou Polarizátor **Glan-Thompson - Thorlabs GTH5M**, Kontrolér polarizace **Thorlabs FPC562** a optický izolátor **IO-H-1310APC**.

6.4.1 Polarizátor Glan-Thompson - Thorlabs GTH5M (P)



Obr. 6.6: Polarizátor [24]



Obr. 6.7: Polarizace v polarizátoru [24]

Technická specifikace:

- materiál: přírodní vápenec v laserové kvalitě
- poměr zániku 100000:1
- spektrální rozsah 350 nm – 2,3 μm
- rozsah clony 5 x 5 mm
- zkreslení tvaru vlnoplochy přes clonu $\leq \lambda/4$
- kvalita povrchu 20-10 poškrábání/dig

6.4.2 Kontrolér polarizace Thorlabs FPC562



Obr. 6.8: Kontrolér polarizace [23]

Technická specifikace:

- průměr smyčky 2.2" (56 mm)
- rotace pádla $\pm 117,5^\circ$
- rozměry pádla 12.5" x 1.0" (317.5 mm x 25 mm)
- vlnová délka 1260 – 1620 nm
- konektor FC/APC
- ztráty ohybem $\leq 0,1$ dB

6.4.3 IO-H-1310APC - Fiber Isolator



Obr. 6.9 Izolátor [8]

- vlnová délka 1310 ± 15 nm
- maximální výkon 300 mW
- izolace 35 - 40 dB
- průchozí útlum 0.3 - 0.7 dB
- PDL: ≈ 0.1 dB
- zpětné ztráty > 55 dB
- vlákna SMF-28e
- konektory FC/APC

6.5 Vlákno

Pro konstrukci senzoru lze použít dva typy optických vláken, a to jednovlákenná vlákna (SM) a polarizovaná vlákna (PM). V SM vláknu se díky ohýbání a kroucení vyvolává dvojlom. Tudiž v tomto vláknu může nastat náhodné kolísání stavů polarizace, takže v nejhorším

případě je možné, že mohou být navzájem světelné paprsky kolmé, což povede k zeslabování signálu. Tento problém lze překonat pomocí vlákna PM, které však nelze použít při realizaci z finančních důvodů. Proto zůstaneme u využití vlákna SM.

Technická specifikace použitého vlákna **SMF-28-J9**:

- pracuje na vlnové délce 1260 - 1620 nm
- průměr opláštění $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$
- maximální útlum $<0.35 \text{ dB/km @ } 1310 \text{ nm}$, $<0.20 \text{ dB/km @ } 1550 \text{ nm}$

6.6 Detektor (D)

V zásadě existují tři typy komerčně dostupných fotodetektorů: fotorezistor, PIN detektory a lavinové fotodetektory (APD). PIN detektor je nejlepší volbou pro náš senzor, protože má vysokou kvantovou účinnost. Intenzita modulovaného světelného paprsku je zachycena a převedena na odpovídající proud. Ve srovnání s APD přijímačem má výhodnější provozní vlastnosti, zejména v delší vlnové délce.

Vybraný detektor **Thorlabs DET01CFC/M**:



Obr. 6.10: Detektor [25]

Technická specifikace:

- detektor InGaAs
- vlnová délka 800 – 1700 nm
- šířka pásma 2 GHz
- maximální špičkový výkon 70 mW
- citlivost 0.95 A/W při 1550 nm
- doba náběhu/doběhu 100 ps
- proud 0.7 nA (2.5 nA Max)
- vstupní konektor SMA

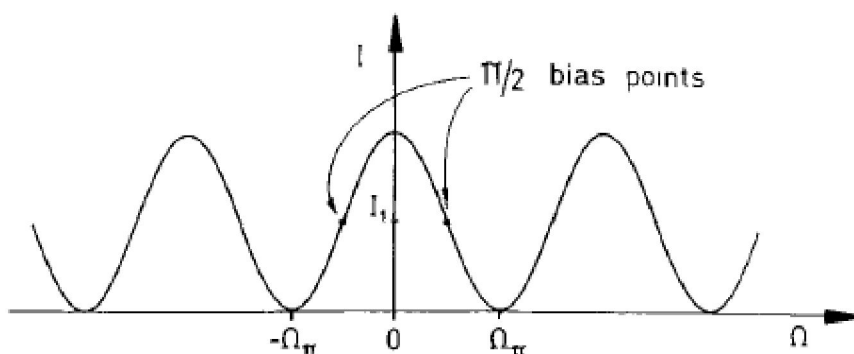
- výstupní konektor FC/PC

6.7 Fázový modulátor

Vzájemná konfigurace poskytuje rušení signálu. Abychom získali vysokou citlivost, musíme tento zkreslený signál vrátit zpět, tak aby byl vrácen k původní nenulové reakci (Obr. 6.11) . Toho je efektivně získáno použitím modulátoru vzájemné fáze, umístěným na konci cívky. Použitá fáze modulační $\Phi_m(t)$ vyvolá fázový rozdíl modulační:

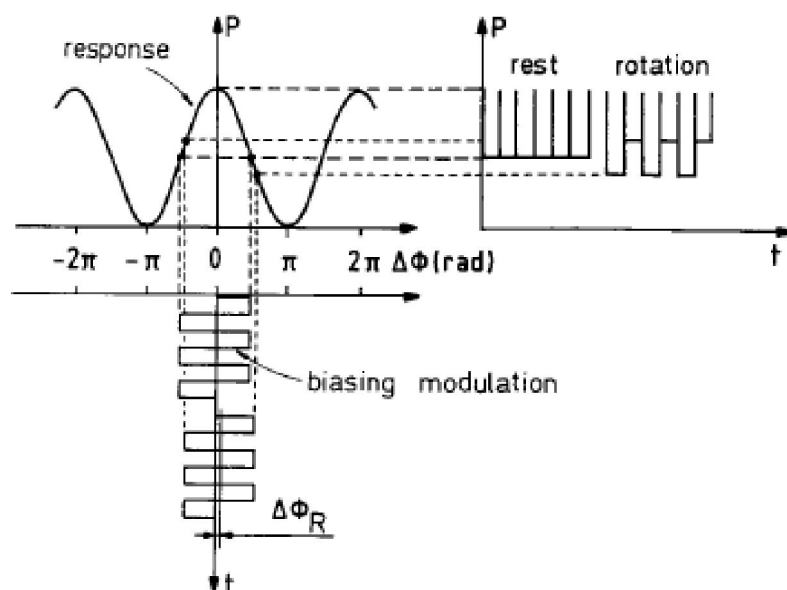
$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta\tau_g), \quad (34)$$

kde $\Delta\tau_g$ je díl skupinového tranzitního času mezi dlouhými a krátkými cestami, které připojují modulátor k děliči [16].

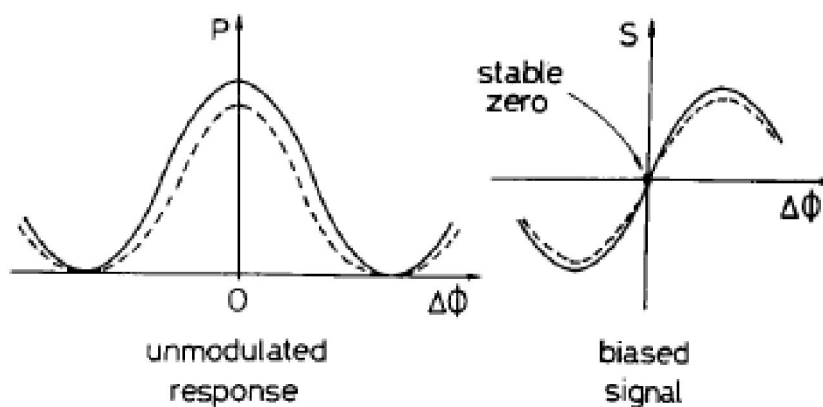


Obr. 6.11 Základní reakce [16]

Tato technika může být implementována s modulací čtvercové vlny. V klidovém stavu je ve středu zkreslená modulační, ale v rotaci se signál stává nevyvážený Obr. 6.12, což vyvolává modulovaný výstup, což může být demodulováno za účelem zkreslené sinus reakce s velmi stabilní nulou, jelikož optický výkon a závislost modulační amplitudy jsou násobné Obr. 6.13.



Obr. 6.12 předpětřová modulace čtvercové vlny [16]



Obr. 6.13 Nemodulovaná reakce a demodulovaný zkreslený signál FOG [16]

Použití vzájemného modulátoru je zásadní, jelikož průměrná hodnota periodické modulace fázového rozdílu je absolutně soustředěná kolem nuly bez jakékoli nepravé odchylky náchylné k posunu [16]

$$\Delta\phi_m(t) = [\phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta\tau_g)] = 0. \quad (35)$$

Vybraný modulátor: **Thorlabs EO-PM-NR-C3**



Obr. 6.14: Fázový modulátor [21]

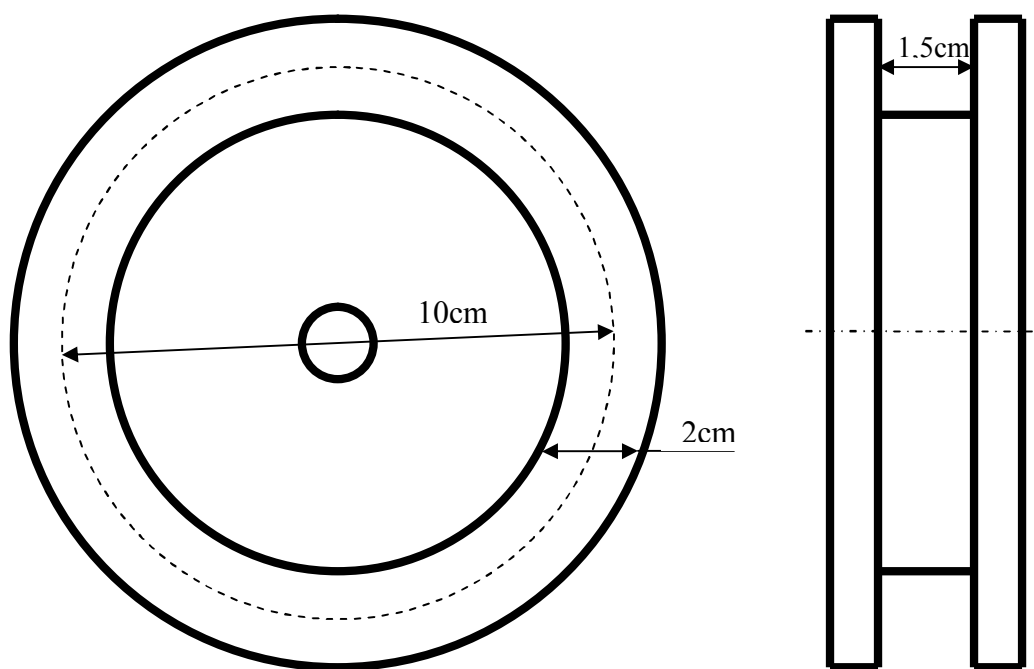
Technická specifikace:

- rozměry: 2.60" x 1.25" x 1.25" (délka x šířka x výška)
- širokopásmové připojení DC
- širokopásmové AR krytí
- vlnová délka 1250 – 1650 nm
- vstupní konektor SMA
- pracovní frekvence do 100 MHz
- maximální optický výkon 2W/mm^2 při 532 nm, 4W/mm^2 při 1064 nm
- průměr clony 2 mm

6.8 Optovláknová cívka

Při návrhu cívky jsem vycházel ze dvou úvah. První důležitá věc je navrhnout rozměry tak, aby se daný počet metrů vlákna vešel do torza cívky. Druhá úvaha byla, aby byly rozměry praktické pro výrobu takového torza cívky. Z teoretického základu je jasné, že čím je delší optické vlákno, tím dosáhneme větší citlivosti senzoru. Ideální by tedy bylo vlákno co nejdelší. Musíme však volit vhodný kompromis s ohledem na praktické a ekonomické sestavení senzoru. Proto jsem stanovil délku optického vlákna 800 m. Ve školní laboratoři bylo k dispozici SM vlákno pouze o délce 365 m. Proto tato délka vlákna byla navinuta do vyrobeného torza cívky. Torzo cívky bylo vyrobeno z kovového materiálu – hliníkové slitiny.

Rozměry cívky:

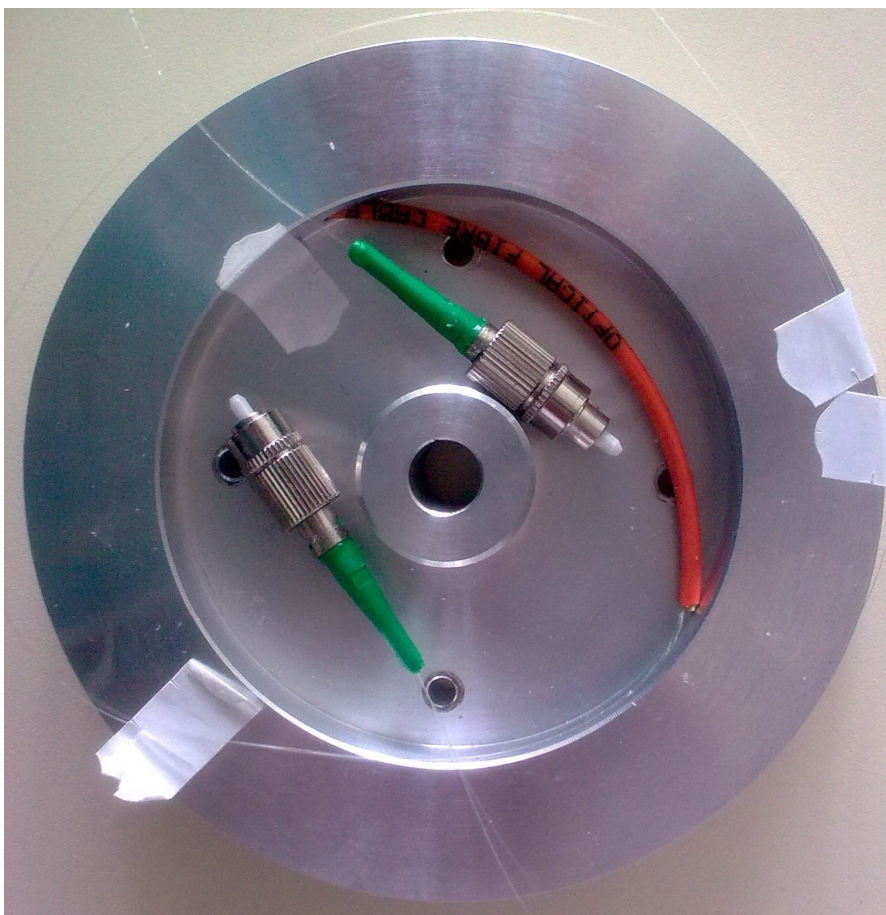


Obr. 6.15 Rozměry cívky

N je počet závitů na cívce

$$N = \frac{L}{2\pi R} = \frac{365}{2\pi * 0,05} \doteq 1162z. \quad (36)$$

Předpokládal jsem, že cívku umístím na otočný laboratorní stůl. S cívkou by se pootočilo s různými úhlovými rychlostmi. Všechny vypočtené hodnoty jsou vztaženy na úhlovou rychlost $20^\circ/\text{s}$, což odpovídá $0,35 \text{ rads}^{-1}$.



Obr. 6.16 Reálná cívka

6.9 Konektorování optického vlákna

Optický konektor je důležitá pasivní optoelektronická součástka, která musí zajistit rozebíratelné propojení dvou vláken. Vláknem je zalepeno ve feruli a jeho konec je zaleštěn spolu s čelem ferule do jedné plochy. Nedůležitějším požadavkem kladeným na optický konektor je malý útlum a dobrá opakovatelnost spojení. Vložený útlum konektoru má v zásadě příčiny dvojího druhu:

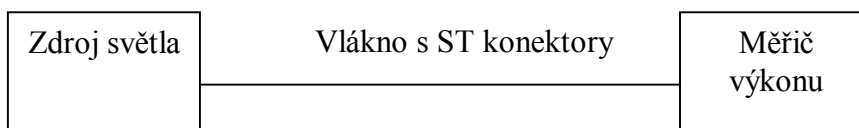
- a) vnitřní ztráty (rozdílné parametry spojovaných vláken) – rozdílné průměry jádra nebo pláště, nesoustřednost, nekrulovitost, rozdílné numerické apertury,
- b) vnější ztráty (mechanické chyby vzniklé při výrobě nebo montáži) – nesoustřednost spojovaných vláken, podélné oddálení nebo úhlová odchylka čelních ploch vláken, poškozené nebo znečištěné čelní plochy.

V tomto projektu bylo zapotřebí zakončit konektory optovláknovou cívku. V celé sestavě optovláknového interferometru využívám konektorové spoje typu FC, proto byl i tento typ konektoru instalován na cívku. FC konektor je vyvinut společností Amphenol Fiber Optic Products. Na přichycení konektoru ke spojce se používá závit. Na začátku 90. let to byl u nás asi nejpobulárnější a nejpoužívanější konektor pro instalaci SM vláken. Přesný typ konektoru, který používám, je FC/APC (Obr. 6.17) , který má oproti FC/PC lepší přenosové vlastnosti. Jeho úhel skosení je 8°.



Obr. 6.17 Konektor FC/APC

Samotná technologie konektorování (spojů) optických vláken je složitá a náročná problematika. Z této úvahy jsem nejdříve provedl cvičné konektorování. Použil jsem bajonetový typ konektoru ST s dlouhou ferrulí vyvinutý společností AT&T. Koncem devadesátých let to byl u nás nejmasověji používaný konektor pro instalace převážně M vláken pro technologii 10Base-FL a 100Base-Fx. Použití tohoto konektoru však vyvolává obtíže díky pružině, která tlačí vnitřek konektoru ven, a proto není jisté, zda je konektor správně upevněn ve spojce. Dnes se již používá v omezené míře. Jeho hlavní výhodou je nízká cena.



Obr. 6.18 Schéma pro měření optického výkonu

Po zkušebním konektorování vlákna s konektory ST jsem přešel na zakončení optovláknové cívky se zmiňovanými konektory FC/APC. Konektorování se úspěšně povedlo s naměřeným referenčním přenosovým výkonem 142,66 μW v jednom směru. Ve druhém směru jsem se dostal na hodnotu až 174,7 μW . Světelný zdroj byl nastaven na vlnové délce 1310 nm. Jednotlivé naměřené referenční hodnoty byly velice slibné. Avšak ve chvíli, kdy jsme cívku zapojili přes další optovláknové pasivní prvky (spojky atd.) nastal problém. Přenosový výkon

byl oběma směry téměř nulový. V jednom směru byl útlum 30,7 dB v druhém 31,9 dB. S největší pravděpodobností byla na vině nesouosost spojovacích vláken.

| Měření | V prvním směru [μW] | V opačném směru [μW] |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. měření | 142,3 | 171,6 |
| 2. měření | 139,8 | 180,1 |
| 3. měření | 146 | 172,4 |
| Průměrná hodnota | 142,66 | 174,7 |

Tabulka 1 Naměřené hodnoty pro první konektorování cívky

Po neúspěšném prvním napojení cívky na konektory jsem učinil nový pokus. Opět jsem důkladně a tak, jak určuje technologický proces, nakonektoval nové spoje cívky. Obdržel jsem tyto výsledky:

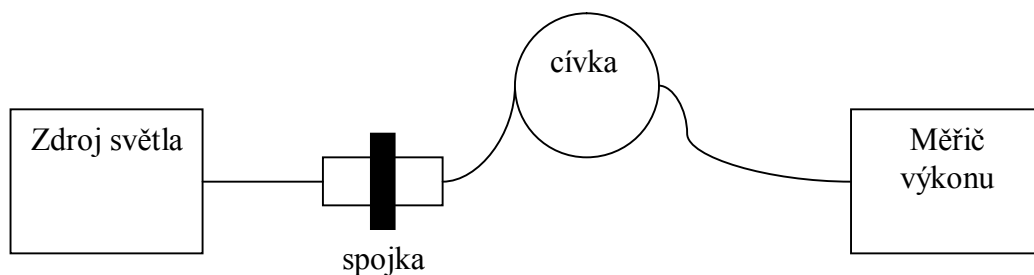
| Měření | Referenční hodnota [μW] | Spojka před cívkou [μW] | Spojka za cívkou [μW] |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Jeden směr – 1. měření | 53,5 | 18,7 | 0,122 |
| Jeden směr – 2. měření | 52,1 | 18 | 0,259 |
| Jeden směr – 3. měření | 56,1 | 17,2 | 0,321 |
| Průměrná hodnota | 53,9 | 17,96 | 0,234 |
| Druhý směr – 1. měření | 2,43 | 0,253 | 0,113 |
| Druhý směr – 2. měření | 4,21 | 0,652 | 0,24 |
| Druhý směr – 3. měření | 1,93 | 0,283 | 0,096 |
| Průměrná hodnota | 2,85 | 0,396 | 0,15 |

Tabulka 2 Naměřené hodnoty pro nové konektorování

| Měření | Spojka před cívkou [dB] | Spojka za cívkou [dB] |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Jeden směr – 1. měření | 4,57 | 26,42 |
| Jeden směr – 2. měření | 4,62 | 23,04 |
| Jeden směr – 3. měření | 5,13 | 22,42 |
| Průměrná hodnota | 4,77 | 23,62 |
| Druhý směr – 1. měření | 9,82 | 13,33 |
| Druhý směr – 2. měření | 8,1 | 12,44 |
| Druhý směr – 3. měření | 8,34 | 13,03 |
| Průměrná hodnota | 8,57 | 12,79 |

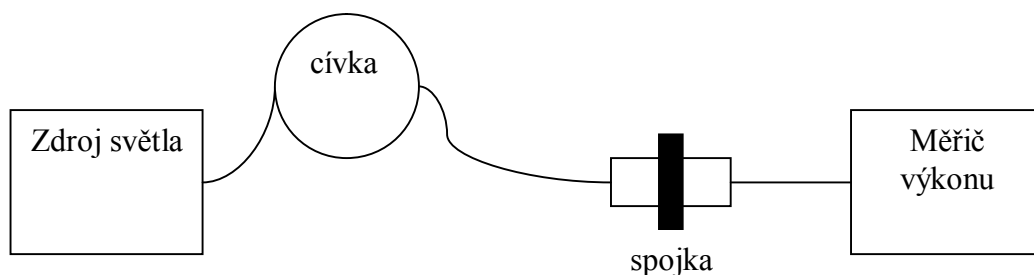
Tabulka 3 Vyjádřený útlum v dB

Schéma zapojení pro měření „spojka před cívkou“:



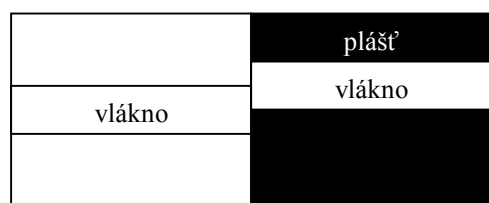
Obr. 6.19 Spojka před cívkou

Schéma zapojení pro měření „spojka po cívce“:

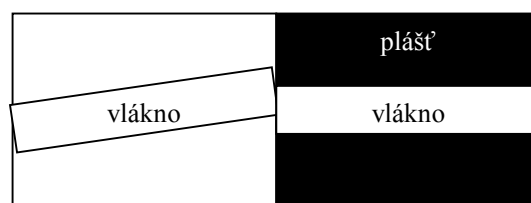


Obr. 6.20 Spojka za cívkou

Druhé výsledky potvrzují velké vnější ztráty, které vznikly při výrobě spoje optovláknové cívky. Měření jsem provedl pro více spojek a propojovacích optických kabelů, abych vyloučil případnou závadu dané spojky. S největší pravděpodobností jde o nesouosost SM vlákna v konektoru případně o úhlovou odchylku čelních ploch vláken. V našich laboratorních podmínkách bohužel nejsme schopni zajistit eliminaci těchto mechanických chyb. Tyto chyby by se daly odstranit dvěma způsoby. První možností je spojit se s odbornou firmou, která se zabývá problematikou optických spojů, a s využitím jejích možností cívku profesionálně nakonektorovat. Druhou variantou je zakoupit hotovou optovláknovou cívku s již danými konektory. Ani jednu z variant jsem však nemohl uskutečnit z časových a převážně ekonomických důvodů.



Nesouosost vlákna



Úhlová odchylka vlákna

Obr. 6.21 Problém realizace

Měření bylo prováděno na přístrojích s vlnovou délkou 1310nm:

Stabilizovaný zdroj záření LSX-1/1310/FC MIKROKOM s.r.o., v.č.:089718

Měřič optického výkonu THORLABS PM20

7 Závěr

V bakalářské práci jsem měl za úkol řešit problematiku vláknového interferometru založeného na Sagnacově jevu. Seznámit se s problematikou měření úhlové rychlosti založené na tomto jevu. Dále nastudovat jednotlivé možné konstrukce zapojení. Navrhnout laboratorní úlohu a rozebrat jednotlivé komponenty pro realizaci optovláknového senzoru pro měření úhlové rychlosti. Nadále tento senzor zprovoznit a stanovit jeho vlastnosti.

V první části, která vycházela ze semestrální práce, jsem studoval problematiku interference jako takové a také to, za jakých podmínek může světelný paprsek interferovat. Zabýval jsem se interferenčními maximy a minimy. Dále jsem se obecně seznámil s jednotlivými možnými interferometry, pronikl jsem do jejich základních principů. V druhé části práce jsem se seznamoval s rotačním pohybem, studoval jsem problematiku úhlové rychlosti, následného úhlového zrychlení a úhlové dráhy. V dalších krocích práce jsem se snažil proniknout do problematiky realizace optovláknového interferometru založeného na Sagnacově jevu. Podrobně jsem se seznámil s možnými konstrukcemi a následně jsem je popsal. Rozebral jsem vlastnosti jednotlivých komponent. Následně jsem řešil návrh základní konfigurace pro realizaci senzoru.

Sagnacův optovláknový interferometr pro měření úhlové rychlosti konfiguruji dle metody „Open-Loop“ nebo-li otevřená smyčka interferometru. Jednotlivé komponenty jsem navrhl pro minimální sestavu tohoto senzoru. U praktické realizace snímače jsem narazil na problém konektorování optického vlákna cívky, který se mi vyřešit nepodařil, přestože jsem se problém snažil odstranit mnoha způsoby a pokusy. Po konzultaci s odborníky a vedoucím práce jsem dospěl k závěru, že v našich laboratorních podmínkách nelze zabezpečit spolehlivý spoj. V případě pokračování úlohy sestavení optovláknového interferometru navrhuji zakoupit odborně zhotovenou optovláknovou cívku, na jejich koncích budou profesionálně zapuštěné konektory FC/APC. Vláknó cívky doporučuji v délce 800 - 1000m. Nabízí se tři možnosti realizace. První z nich je zakoupit cívku s polarizovaným vláknem např. Thorlabs PM980-XP, pořizovací cena se bude pohybovat okolo 400 000,- Kč. Druhou možností je zakoupit cívku se SM vláknem s malým průměrem pláště např. Thorlabs SM980-5.8-125, kde se cena bude pohybovat okolo 80 000,- Kč. Nejlevnější variantou se nabízí použít SM vlákno od Thorlabsu SMF-28 s pořizovací cenou cca 15 000,- Kč. Toto vlákno se především používá v telekomunikacích. Každopádně pořízení cívky je nezbytnou součástí pro zdárnou realizaci

tohoto snímače. Z důvodu této chybějící komponenty se mi nepodařilo snímač prakticky realizovat, proměřit a stanovit jeho vlastnosti.

8 Literatura

- [1] SVOBODA, E a kol. *Přehled středoškolské fyziky*. Praha: Prometheus, 2003, s. 497. ISBN: 80-7196-116-7.
- [2] WIKIPEDIE. *Interference* [online]. [citováno 2011-10-28]. Dostupný z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Interference> .
- [3] CHOVANĚČEK, L. *Dynamický laserový interferometr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.
- [4] *Úloha č.3 – Interferometry a vlastnosti laserového záření* [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechniky, 7 stran. [cit. 22.11.2011]. Dostupné z: http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf .
- [5] *Základní fyzikální měření IV, 07 – Michelsonův interferometr* [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky. 4 strany. [citováno 2011-11-24]. Dostupné z: <http://mvt.ic.cz/dva/zfm-kvo/zfm-kvo-08.pdf> .
- [6] SALEH, B.E.A. a TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995.
- [7] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika - Mechanika: rotační pohyb*. Brno: Vutium a Prometheus, 2000.
- [8] DATASHEET, THORLABS DET01CFC/M [online]. [citováno 2012-5-12]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partnumber=IO-H-1310APC>
- [10] VRBOVÁ, M. a kol. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994.
- [11] *Laser a princip jeho činnosti* [online]. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. 8 s. Dostupný z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_u315.pdf .
- [12] HRADIL, Z, et al. *Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách: Soubor experimentálních úloh*. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2008. 71 s.
- [13] PROJEKTALFA. *Polarizace světla* [online]. [citováno 2011-12-7]. Dostupný z: http://projektalfa.ic.cz/polarizace_svetla.htm
- [14] BENNETT, M. S, et al. *Fiber optic rate gyros as replacements for mechanical gyros*. 1998, s. 8.
- [15] GORASIA, J. *Fiber Optic Gyroscopes*. 2010, s. 17.

- [16] LEFÉVRE, C. H. *Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscopes*. 1997, s. 20-27.
- [17] ERLER, T. *The Fiber Optic Gyroscopes – a Sagnac Interferometer for Inertial Sensor Applications*. 2007.
- [18] BAURA, T. *Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 88 s, 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [19] NAYAK, J. *Applied optics, Fiber-optic gyroscopes: from design to production*. 2011, s. 152-161.
- [20] LEFÉVRE, C. H, et al. *An Overview of Fiber-optic Gyroscopes*, 1984. s. 91-107.
- [21] DATASHEET, THORLABS EO-PM-NR-C3 [online]. [citováno 2011-12-08].
Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/980.pdf>.
- [22] DATASHEET, THORLABS 10202A-50-APC [online]. [citováno 2011-12-08].
Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/1113.pdf>.
- [23] DATASHEET, THORLABS FPC562 [online]. [citováno 2011-12-08].
Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/1133.pdf>.
- [24] DATASHEET, THORLABS GTH5 [online]. [citováno 2011-12-08].
Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/906.pdf>.
- [25] DATASHEET, THORLABS DET01CFC/M [online]. [citováno 2011-12-08].
Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/catalogpages/v20/1287.pdf>.
- [26] PRILUTSKII, E. V, et al. *Interferometric closed-loop fiber optic gyroscopes with linear output*. Zelenograd: Moscow Institute of Electronic Technology, plant “Proton”, s. 9.
- [27] MERLO, S., MICHELE N. a SILVANO D. *Fiber gyroscope principle*. 2000, s. 23.
- [28] LAWRENCE, A. *Modern Inertial Technology: The Interferometric Fiber-Optic Gyro*. © Springer-Verlag New York. 1998, s. 20.